



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Studijní program N2301 - Strojní inženýrství

Strojírenská technologie
zaměření slévání a svařování

Katedra strojírenské technologie
Oddělení strojírenská metalurgie

Sledování tepelných poměrů v soustavě odlitek - forma při gravitačním lití

Monitoring of thermal proportion in the casting – form system at the gravity casting

Bc. Michaela Lejsková

KSP – SM – 557

Vedoucí diplomové práce: prof. Ing. Iva Nová, CSc.

Konzultant diplomové práce: Ing. Iva Nováková, Ph.D., Ing. Josef Horáček

Rozsah práce a příloh:

Počet stran	80
Počet tabulek	26
Počet příloh	4
Počet obrázků	44

Datum: 28.5.2010



A N O T A C E

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Katedra strojírenské technologie

Oddělení strojírenská metalurgie

Studijní program : N2301 – Strojní inženýrství

Diplomant : Bc. Michaela Lejsková

Téma práce : Sledování tepelných poměrů v soustavě odlitek –
forma při gravitačním lití
Monitoring of thermal proportion in the casting – form
system at the gravity casting

Číslo DP : KSP – SM – 557

Vedoucí DP : prof. Ing. Iva Nová, CSc. – TU v Liberci

Konzultant : Ing. Iva Nováková, Ph.D., Ing. Josef Horáček

Abstrakt:

Diplomová práce se zabývá sledováním teplotních polí při gravitačním odlévání do kovové slévárenské formy a posouzením vhodnosti simulačního programu QuikCAST. V další části práce je proveden výpočet teplotních polí pomocí Gaussova integrálu chyb v okamžiku ztuhnutí odlitku a porovnání naměřených a vypočtených hodnot.

Abstract:

This thesis deals with the monitoring of temperature fields at gravity casting to the metal casting form and with evaluation of the simulation program QuikCAST. In the next part of this thesis, calculations of temperature fields are performed by using the Gaussian error integral at the moment of solidified casting and comparison of measured and calculated values.



Místopřísežné prohlášení:

Místopřísežně prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracovala samostatně s použitím uvedené literatury.

V Liberci, 28. května 2010

.....
Bc. Michaela Lejsková
Pod Loretou 584
293 06 Kosmonosy



OBSAH

1. ÚVOD.....	11
2. TEORETICKÁ ČÁST.....	13
2.1 Tepelné děje v soustavě odlitek-forma.....	13
2.1.1 Přenos tepla v tekutém kovu.....	14
2.1.2 Tepelné poměry v soustavě tuhnoucí tavenina-kovová forma.....	15
2.1.3 Intenzita přestupu tepla mezi odlitkem a formou.....	22
2.1.4 Sdílení tepla ve slévárenské formě.....	26
2.1.5 Přestup tepla z formy do okolí.....	31
2.2 Tepelně-fyzikální veličiny slévárenských forem.....	32
2.2.1 Měrná tepelná kapacita.....	32
2.2.2 Součinitel tepelné vodivosti.....	33
2.2.3 Součinitel teplotní vodivosti.....	33
2.2.4 Součinitel prostupu a přestupu tepla.....	34
2.2.5 Součinitel tepelné akumulace.....	35
2.3 Slévárenské simulační programy.....	35
2.3.1 Principy simulačních programů.....	37
2.3.2 Simulace plnění formy.....	38
2.3.3 Simulace tuhnutí.....	39
3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....	40
3.1 Popis experimentálního zařízení.....	40
3.1.1 Použitá slévárenská forma.....	41
3.1.2 Použité termočlánky.....	44
3.1.3 Sběrnice dat OMEGA	45
3.1.4 Slitiny použité pro odlévání.....	46
3.2 Provedené experiment.....	47
3.3 Simulační výpočet teplotního pole formy.....	48
3.4 Výpočet teplotního pole formy pomocí Gaussova integrálu.....	62
3.5 Vyhodnocení experimentu.....	73
3.5.1 Vyhodnocení křivek časových závislostí na teplotě v jednotlivých místech slévárenské formy.....	73
3.5.2 Vyhodnocení výpočtu teplotního pole pomocí Gaussova integrálu chyb.....	75
4. DISKUSE VÝSLEDKŮ.....	76



5.	ZÁVĚR.....	78
6.	POUŽITÁ LITERATURA.....	80
	PŘÍLOHY	



SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

T - teplota [K]

t - čas [s]

a - teplotní vodivost taveniny [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]

v_x, v_y, v_z - rychlost pohybu elementu taveniny v příslušném směru souřadného systému [m/s]

∇^2 - Laplaceův operátor [-]

ρ - hustota proudícího média [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]

v - rychlost [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]

p - tlak [Pa]

g - gravitační zrychlení [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$]

ν - součinitel kinetické viskozity [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]

ξ_1 - tloušťka ztuhlé vrstvy v čase t_1 [mm]

ξ_2 - tloušťka ztuhlé vrstvy v čase t_2 [mm]

X_1^F - tloušťka tepelně ovlivněné vrstvy formy v čase t_1 [mm]

X_2^F - tloušťka tepelně ovlivněné vrstvy formy v čase t_2 [mm]

dQ_o - přírůstek tepla uvolněného při tuhnutí odlitku [J]

dQ_{PR} - přírůstek tepla prošlého rozhraním odlitek - forma [J]

dQ_F - přírůstek tepelné energie, kterou akumuluje forma [J]

m_K - hmotnost kovu [kg]

c_L - měrná tepelná kapacita taveniny [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]

c_S - měrná tepelná kapacita ztuhlé taveniny [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]

L_{KR} - latentní krystalizační teplo [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$]

T_1 - teplota lití [K]

T_L - teplota počátku tuhnutí [K]

T_S - teplota konce tuhnutí [K]

T_{KO} - konečná teplota odlitku [K]

X_O - charakteristický rozměr odlitku [mm]

X_{OV} - tloušťka oxidické vrstvy [mm]

X_P - tloušťka plynové vrstvy [mm]

X_N - tloušťka nátěru [mm]

X_F - charakteristický rozměr formy [mm]

ΔT - rozdíl teplot [K]



- q_o - tepelný tok v odlitku [$W.m^{-2}$]
 q_F - tepelný tok ve formě [$W.m^{-2}$]
 α - součinitel přestupu tepla [$W.m^{-2}.K^{-1}$]
 α_d - součinitel přestupu tepla dotykem [$W.m^{-2}.K^{-1}$]
 T_o - teplota okolí [K]
 T_F - teplota formy [K]
 q - hustotu tepelného toku [$W.m^{-2}$]
 Q - množství tepla prošlého z odlitku do formy [J]
 S - styčná plocha odlitku a formy [m^2]
 q_s - tepelný tok sálání tepla z odlitku do formy [$W.m^{-2}$]
 α_s - součinitel přestupu tepla sáláním [$W.m^{-2}.K^{-1}$]
 C - součinitel sálání [$W.m^{-2}.K^{-4}$]
 T_{PO} - teplota povrchu odlitku [K]
 T_{PF} - teplota povrchu formy [K]
 TPO_M - přechodový tepelný odpor mezery [$W.m^{-2}.K^{-1}$]⁻¹
 β_M - součinitel prostupu tepla v mezeře [$W.m^{-2}.K^{-1}$]
 $TPO_{POČ}$ - počáteční přechodový tepelný odpor [$(W.m^{-2}.K^{-1})^{-1}$]
 TPO_P - odpor způsobený vznikem plynové vrstvy [$(W.m^{-2}.K^{-1})^{-1}$]
 TPO_{OV} - odpor od zoxidovaného povrchu odlitku [$(W.m^{-2}.K^{-1})^{-1}$]
 TPO_N - složka od nátěru [$(W.m^{-2}.K^{-1})^{-1}$]
 λ_{OV} - součinitel tepelné vodivosti oxidické vrstvy odlitku [$W.m^{-1}.K^{-1}$]
 λ_P - součinitel tepelné vodivosti plynové vrstvy [$W.m^{-1}.K^{-1}$]
 λ_N - součinitel tepelné vodivosti nátěru [$W.m^{-1}.K^{-1}$]
 T_{STR} - střední teplota [J]
 α_1 - součinitel přestupu tepla na hranici neoxidické a oxidické vrstvy odlitku [$W.m^{-2}.K^{-1}$]
 α_2 - součinitel přestupu tepla na hranici nátěru a kovové formy [$W.m^{-2}.K^{-1}$]
 Bi_o - Biotovo číslo pro odlitek [K]
 Bi_F - Biotovo číslo pro formu [K]
 ΔT_O - rozdíl teplot v odlitku [K]
 ΔT_F - rozdíl teplot ve formě [K]
 λ_O - součinitel tepelné vodivosti odlitku [$W.m^{-1}.K^{-1}$]
 λ_F - součinitel tepelné vodivosti formy [$W.m^{-1}.K^{-1}$]
 T_{KR} - teplota krystalizace [K]
 Q_F - množství tepla, které je forma schopna [J]



V_F - objem formy [m^3]

c_F - měrná tepelná kapacita formy [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$]

ρ_F - hustota formy [$kg \cdot m^{-3}$]

q_{ZDR} - teplo uvolněné z vedlejších zdrojů [J]

q_v - tepelný výkon vnitřních zdrojů (uvolňováno při fázových přeměnách) [J]

ΔT_M - rozdíl teplot v mezeře [K]

K_O - tepelné kritérium pro ochlazování odlitku [J]

K_F - tepelné kritérium pro ochlazování formy [J]

$\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$ - součinitel tepelné vodivosti ve směrech x, y, z [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]

c_v - měrná tepelná kapacita za stálého objemu [$J \cdot Kg^{-1} \cdot K^{-1}$]

q_v - tepelný výkon vnitřních zdrojů (uvolňováno při fázových přeměnách) [J]

erf - argument Gaussova integrálu chyb

T_{PR} - teplota rozhraní odlitek - forma [K]

a_F - součinitel teplotní vodivosti formy [$m^2 \cdot s^{-1}$]

x - vzdálenost v tělese od nahřívajícího povrchu [m]

b_o - součinitelem tepelné akumulace formy [$W \cdot s^{1/2} \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]

b_f - součinitelem tepelné akumulace formy [$W \cdot s^{1/2} \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]

dQ - přírůstek množství tepla [J]

dT - rozdíl teplot [J]

c_p - měrná tepelná kapacita za stálého tlaku [$J \cdot Kg^{-1} \cdot K^{-1}$]

A, B, C - materiálové konstanty

λ_0 - součinitel tepelné vodivosti při teplotě $0^\circ C$ [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]

b - konstanta

1. Úvod

V průmyslovém podnikání má oblast slévárenství neustále velký význam. S rozvojem vědy a technologických procesů je kladen stále větší důraz na zdokonalení organizace práce a stále kratší termíny dodávek výrobků, přičemž je přirozeně prioritou zachování jakosti odlitků. Průmyslový rozvoj slévárenství nutí podniky k trvalému zvyšování produktivity práce v každé z oblastí své činnosti. Současná doba klade na výrobu odlitků náročné požadavky, kterými jsou zejména dodržení vysoké kvality, vysoké funkčnosti, nízké ceny a krátké dodací lhůty.

Důležitou etapou utváření odlitků jsou děje, při kterých přechází materiál odlitku z tekuté do tuhé fáze. Odlitek získává svůj tvar, strukturu a tím i fyzikální a mechanické vlastnosti. Právě v této etapě mohou vznikat vady odlitku, např. deformace, pórovitost, staženiny, řediny a podobně. Tento děj je charakterizován tepelnými procesy, k nimž dochází mezi odlitkem a formou a také okolím formy. Forma zastává ve vztahu k odlitku funkci okolního prostředí, tj. akumuluje a odvádí jeho teplo.

Sledování tuhnutí odlitků ve slévárenské formě se pro svou důležitost z hlediska finálního výsledku celého výrobního procesu stalo předmětem velkého zájmu odborníků, kteří na toto téma vytvořili celou řadu publikací.

Pokud chceme vytvořit odlitek se zaručenými konkrétními vlastnostmi, jedná se o komplexní průběh složitých fyzikálních, chemických a tepelných pochodů, k nimž dochází zejména v odlitku, ve formě a v hraničním pásmu mezi nimi.

Abychom pochopili výše uvedené procesy, potřebujeme mít znalosti tepelně - fyzikálních zákonitostí této oblasti a rovněž fyzikálních vlastností materiálů, jako jsou např.:

- a) struktura a fyzikálně - slévárenské vlastnosti tavenin;
- b) tepelné a fyzikální pochody v soustavě odlitek - forma;
- c) krystalizace slitin, vznik struktury;
- d) tuhnutí odlitků a jeho průvodní jevy, tj. tepelný režim procesu, vznik teplotních polí v odlitku, rychlost tuhnutí, její nerovnoměrnost a doba tuhnutí;
- e) chladnutí odlitku a jeho průvodní jevy tj. např. vznik napětí, trhlin a prasklin.

Tuhnutím odlitků a matematickou simulací těchto dějů v různých slévárenských formách se dlouhodobě zabývají pracovníci Katedry strojírenské technologie, FS - TU v Liberci. Dříve byl k tomuto účelu používán simulační software WinCast/Simtec.



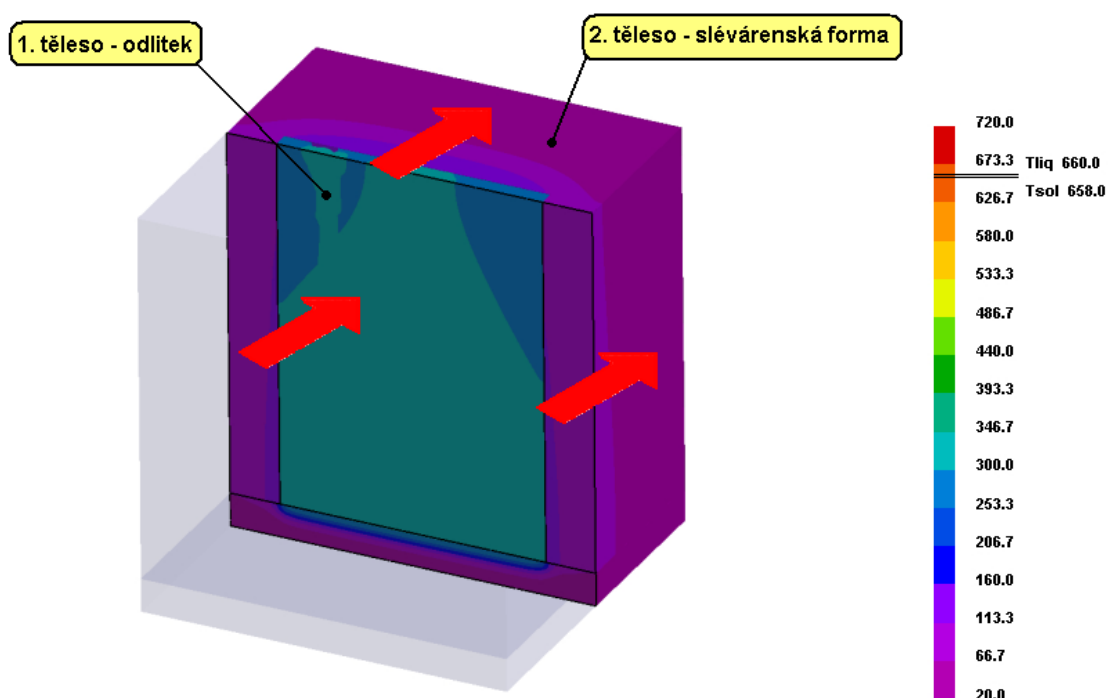
V současné době je na tomto pracovišti využíván simulační program QuikCAST. S problematikou řešení tepelných dějů je spojena má diplomová práce, která je řešena na téma: „Sledování tepelných poměrů v soustavě odlitek - forma při gravitačním lití“. Cílem této diplomové práce je seznámit se s problematikou a průběhem řešení teplotních polí v dané slévárenské kovové formě, následné grafické znázornění rozložení teplot ve stěně formy v okamžiku ztuhnutí odlitku naměřených hodnot a současné porovnání s vypočtenými hodnotami pomocí Gaussova integrálu chyb.

2. TEORETICKÁ ČÁST PRÁCE

Výroba odlitků představuje velmi složitý proces, který se skládá z jednotlivých na sebe navazujících etap, které tvoří soubor velmi složitých fyzikálních, fyzikálně-chemických i chemických dějů. Výsledné vlastnosti odlitku jsou ovlivněny tepelnými podmínkami v soustavě odlitek-slévárenská forma v průběhu odlévání, tuhnutí a chladnutí odlitku.

2.1 Tepelné děje v soustavě odlitek - kovová forma

Tepelné děje v soustavě odlitek (resp. tavenina) - slévárenská forma jsou z fyzikálního hlediska charakterizovány jako velice složitý proces sdílení tepla mezi dvěma tělesy. Odlitek (první těleso) tepelnou energii uvolňuje, slévárenská forma (druhé těleso) tepelnou energii přijímá, viz obr. 2.1. Tyto děje jsou však komplikovány tím, že dříve, než vznikne odlitek, probíhá přenos energie mezi tuhnoucí taveninou a slévárenskou formou [1].



Obr. 2.1 Sdílení tepelné energie mezi odlítkem a slévárenskou formou

2.1.1 Přenos tepla v tekutém kovu

V tekutém kovu - tavenině se šíří teplo kondukcí (vedením) a konvekcí (prouděním). Musíme uvažovat, že v proudící tavenině dochází i ke změnám její teploty. Tepelné děje v tavenině jsou popisovány Fourierovou - Kirchhoffovou diferenciální rovnicí vedení tepla:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = v_x \cdot \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \cdot \frac{\partial T}{\partial y} + v_z \cdot \frac{\partial T}{\partial z} = a \cdot \nabla^2 \cdot T, \quad (2.1)$$

kde značí: T - teplota [K];

t - čas [s];

a - teplotní vodivost taveniny [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$];

v_x, v_y, v_z - rychlost pohybu elementu taveniny v příslušném směru
souřadného systému [m/s];

∇^2 - Laplaceův operátor [-].

V proudící tavenině závisí teplotní pole na rychlosti jejího proudění. Při něm vzniká tření, které je nutno při průběhu tepla taveninou brát v úvahu. To znamená, že je sdílení tepla v tavenině závislé nejen na tepelných, ale i na hydrodynamických pochodech. Pro plnění slévárenské formy taveninou je možné uplatnit Navier - Stokesovu rovnici:

$$\rho \cdot \underline{v} \cdot \underline{v} \cdot \text{div}(\rho \cdot \underline{v}) = \rho \cdot g + \text{grad}(p) + \nabla \cdot \Delta \underline{v}, \quad (2.2)$$

kde značí: ρ - hustota proudícího média [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$];

v - rychlost [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$];

p - tlak [Pa];

g - gravitační zrychlení [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$];

ν - součinitel kinetické viskozity [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$].

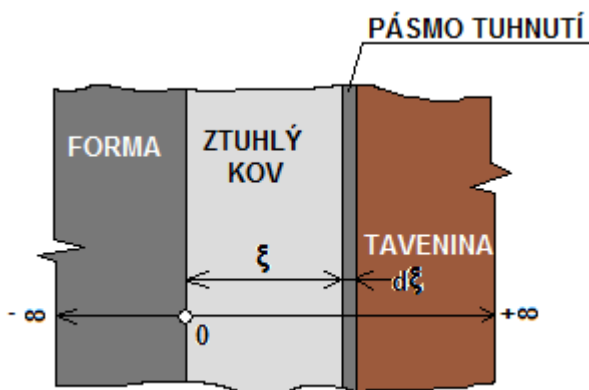
Pohyb taveniny ve slévárenské formě lze pro zjednodušení považovat za mechanický pohyb nestlačitelné kapaliny pouze za podmínky, že není brána v úvahu anizotermičnost celého děje [1], [2].

2.1.2 Tepelné poměry v soustavě tuhnoucí tavenina - kovová forma

Po odlití roztaveného kovu do slévárenské formy dochází ke sdílení tepla mezi formou a odlitkem, klesá teplota taveniny a vzrůstá teplota na líci formy. Při poklesu teploty kovu na teplotu solidu (krystalizace) přechází kov ze stavu kapalného do tuhého, viz obr. 2.2. K tomuto jevu dochází nejprve u stěny formy a postupně pokračuje až k tepelné ose odlitku, viz obr. 2.3, tj. až do jeho úplného ztuhnutí. Rychlost tuhnutí odlitku obecně závisí na tepelně-fyzikálních vlastnostech a geometrii soustavy.

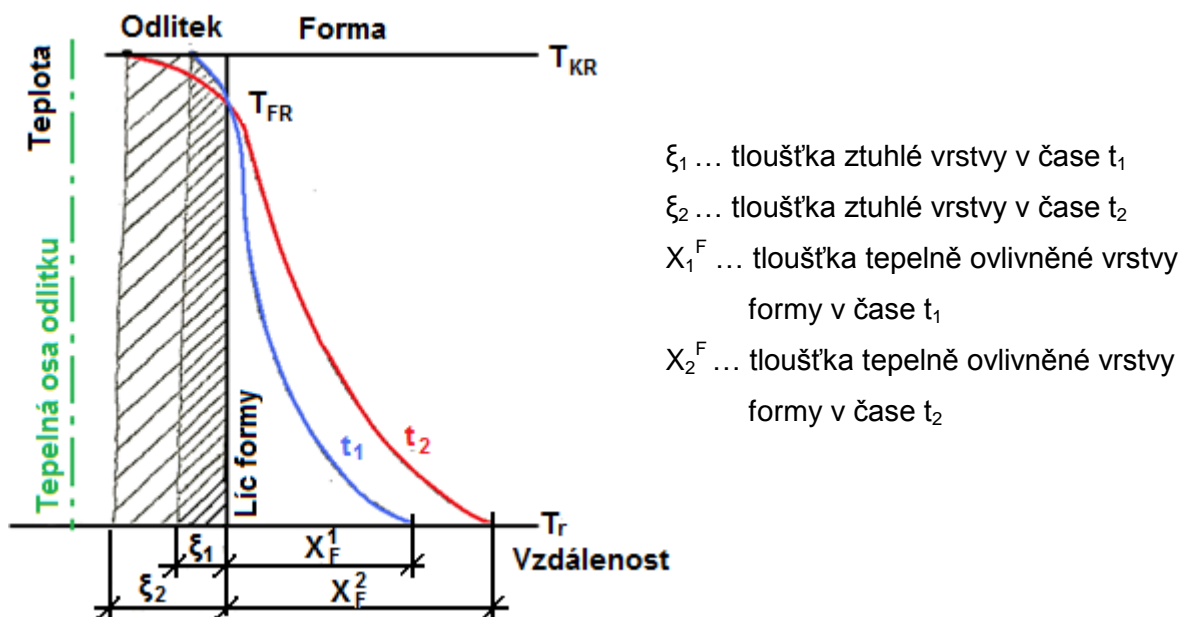
Podmínky pro přestup tepla z tuhnoucího odlitku do formy se mění v průběhu odlévání, tuhnutí a chladnutí.

Bezprostředně po odlití je ve styku roztavený kov s lícem formy až do okamžiku, kdy je odvedeno teplo přehřátí a jsou vytvořeny podmínky pro jeho krystalizaci. Vzniklá vrstva ztuhlého kovu však výrazně ovlivňuje podmínky dalšího přestupu tepla z odlitku do formy.



Obr.2.2 Schéma tuhnutí taveniny v pískové formě s vyznačením pásma tuhnutí

Tepelné podmínky v soustavě tuhnoucí tavenina-forma jsou závislé jak na tepelně-fyzikálních vlastnostech odlévaného materiálu a slévárenské formy, tak i na podmínkách sdílení tepla na rozhraní mezi nimi. Slévárenská forma je jedním z nejdůležitějších faktorů určujících vlastnosti budoucího odlitku. Záleží zejména na její schopnosti akumulovat a odvádět teplo z taveniny a následně i z odlitku. Při tuhnutí odlitku v kovové formě se mezi odlitkem a lícem formy vytvoří velmi tenká mezera.



Obr. 2.3 Řez odlitku a slévárenské formy s vyznačením tuhnutí vrstev odlitku a rozložení teplot v příslušných časech

V soustavě odlitek-forma probíhá řada pochodů. Mezi nejdůležitější z nich patří:

- přenos tepla v tekutém kovu;
- přenos tepla z taveniny do slévárenské formy;
- uvolňování skupenského tepla při tuhnutí a fázových přeměnách;
- přestup tepla mezi tekutým a ztuhlým kovem v odlitku;
- vedení tepla tuhým kovem;
- přestup tepla z formy do okolí;
- sálání tepla otevřenými nálitky.

Řešení uvedených tepelných pochodů vyžaduje znalosti celé řady podmínek, kterými jsou tyto děje charakterizovány [1], [2].

Mezi odlitkem a slévárenskou formou dochází ke sdílení tepla:

- vedením (kondukcí)** - teplo přechází od částice k částici jejich přímým stykem. Vedením dochází k šíření tepla především v tuhé fázi, např. ve formě a odlitku;
- prouděním (konvekci)** - teplo je převáděno mezifázovým rozhraním a hlavním proudem pohybujícího se média, kterým je nejčastěji tekutina a to



vedením v hraniční vrstvě a pohybem větších shluků molekul předávajícím teplo od hraniční vrstvy do vzdálenějších míst. Proudění se uplatňuje zejména při přenosu tepla v pískové slévárenské formě;

- C) **sáláním** - což je šíření energie ve formě elektromagnetického vlnění, přičemž se na rozdíl od sdílení tepla vedením a prouděním tepelná energie přeměňuje v energii sálavou a naopak [1].

Tyto jednotlivé typy sdílení tepla nevznikají ve skutečnosti izolovaně, ale kombinovaně. Proto si v takových případech všímáme především dějů, které převládají.

Při řešení tepelných poměrů mezi odlitkem a formou je možné za předpokladu určitých zjednodušení vycházet z tepelné rovnováhy, která udává rovnost mezi tepelnou energií uvolněnou z tuhnoucího odlitku, energií prošlou rozhraním odlitek-forma a energií akumulovanou slévárenskou formou. Zjednodušeně lze tyto děje vyjádřit vztahem:

$$dQ_o = dQ_{PR} = dQ_F, \quad (2.3)$$

kde značí: dQ_o - přírůstek tepla uvolněného při tuhnutí odlitku [J];

dQ_{PR} - přírůstek tepla prošlého rozhraním odlitek - forma [J];

dQ_F - přírůstek tepelné energie, kterou akumuluje forma [J].

Celkové množství tepla uvolněného odlitkem, který krystalizuje v intervalu teplot T_L a T_S , lze vypočítat [2]:

$$Q_o = m_K \cdot [c_L \cdot (T_1 - T_L) + L_{KR} + c_S \cdot (T_S - T_{KO})], \quad (2.4)$$

kde značí: m_K - hmotnost kovu [kg];

c_L - měrná tepelná kapacita taveniny [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$];

c_S - měrná tepelná kapacita ztuhlé taveniny [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$];

L_{KR} - latentní krystalizační teplo [$J \cdot kg^{-1}$];

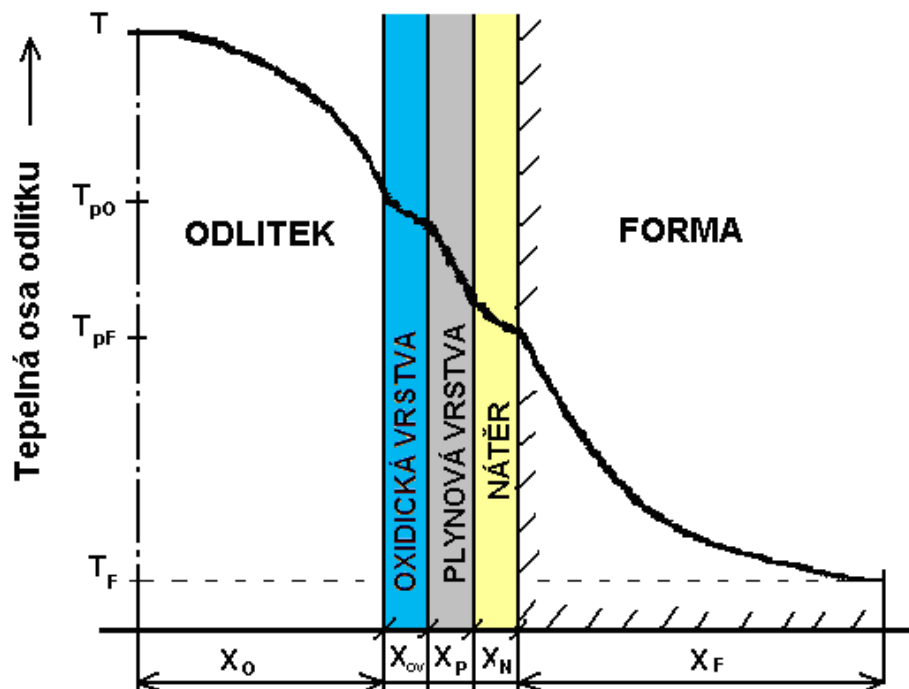
T_1 - teplota lití [K];

T_L - teplota počátku tuhnutí [K];

T_S - teplota konce tuhnutí [K];

T_{KO} - konečná teplota odlitku [K].

Teplo z tuhnoucího odlitku přechází rozhraním odlitek - forma (resp. odlitek - mezera - forma), viz obr. 2.4. Při prvním dotyku kovu s formou dochází k tepelnému šoku, který je charakterizován maximální intenzitou přestupu tepla z odlitku do formy. Jedná se o odvod tepla z přehřátí a tepla krystalizačního. Silně jsou ochlazeny povrchové vrstvy odlitku, většinou až pod teplotu solidu. Z tohoto důvodu již v prvních okamžicích dochází k natuhnutí povrchové vrstvičky kovu s velkým počtem různě orientovaných jemných krystalů tzv. licí kůry, viz obr. 2.5. V převažující tloušťce stěny odlitku se teplota nemění. Rovněž ve formě dochází k intenzivnímu prohřátí pouze u povrchové vrstvy. Od této chvíle může docházet v odlitku ke vzniku povrchových trhlin vlivem smršťovacího napětí [3].



X_o - charakteristický rozměr odlitku

X_{ov} - tloušťka oxidické vrstvy

X_p - tloušťka plynové vrstvy

X_n - tloušťka nátěru

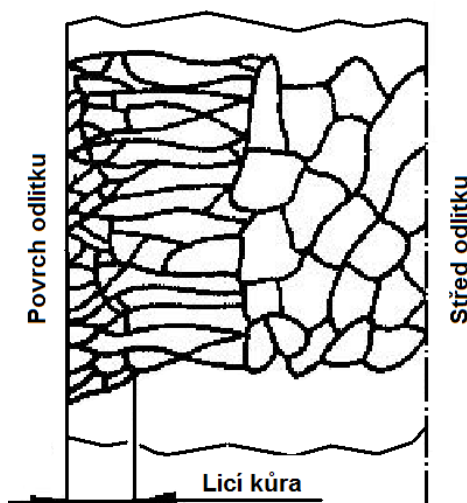
X_F - charakteristický rozměr formy

Obr. 2.4 Rozložení teploty v soustavě odlitek-mezera-forma

Vlivem výše uvedených dějů v odlitku vznikne teplotní gradient ΔT , čímž zákonitě dojde k vývinu tepelného toku q_o , který směřuje z teplejších vnitřních vrstev odlitku k jeho povrchu. Tento tepelný tok způsobí snižování teploty v hlubších vrstvách stěny odlitku a zpomalení ochlazování jeho povrchu. Pouze v ojedinělých případech

dochází k tzv. periodickému tuhnutí odlitku, kdy dojde k pozastavení tuhnutí, nebo dokonce i k roztavení ztuhlé povrchové vrstvičky v důsledku intenzivního přívodu tepla z hlubších vrstev stěny odlitku. K těmto případům dochází někdy u tenkého jádra nebo v hraně formy.

Také ve formě dochází ke zvyšování tepelného toku q_F od styčného povrchu (líce) do hloubky stěny formy. Další sdílení tepla mezi odlitkem a formou probíhá stejným způsobem, ale s menší intenzitou výměny tepla. Je to způsobeno tím, že se snižuje teplota i tepelný objem odlitku a zvyšuje se teplota formy. V důsledku toho klesá rozdíl teplot mezi odlitkem a formou a tím klesá i součinitel přestupu tepla α [1], [2].



Obr. 2.5 Vznik licí kůry v odlitku [3]

Jak již bylo uvedeno, mezi odlitkem a formou může docházet ke sdílení tepla vedením, prouděním a sáláním. V případě kovových forem se nejčastěji výměna tepla děje vedením a prouděním, která probíhají současně a označují se jako výměna tepla dotykem. Sdílení tepla na líci formy lze fyzikálně popsat Newtonovým zákonem (2.5), který určuje hustotu tepelného toku:

$$q = \alpha_d \cdot (T_0 - T_f), \quad (2.5)$$

kde značí: α_d - součinitel přestupu tepla dotykem [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$];

T_0 - teplota okolí [K];

T_F - teplota formy [K].



Množství tepla prošlého z odlitku do formy lze vyjádřit vztahem:

$$Q = \alpha_d \cdot (T_O - T_F) \cdot S \cdot t, \quad (2.6)$$

kde značí: S - styčná plocha odlitku a formy [m^2];

t - čas [s].

V případě kovových forem je situace mnohem složitější. V důsledku její vyšší tepelné akumulace se odlitek poměrně rychle ochlazuje a smršťuje, kovová forma v důsledku ohřevu mění své rozměry. Výsledkem toho je vznik plynové vrstvy mezi ztuhlou vrstvou odlitku a lícem formy. Vznik mezery představuje významné narušení a snížení tepelné výměny mezi odlitkem a formou. Náhlým přerušením přestupu tepla dotykem se ochlazování odlitku zastaví a teplota kovové formy na určitou dobu klesne. Teprve v okamžiku, kdy nabude na účinnosti přenos tepla sáláním, se opět obnoví režim chladnutí odlitku a ohřevu formy. Jedná se ovšem již o podstatně menší intenzitu. Po vzniku mezery tedy dochází mezi odlitkem a formou ke kombinované výměně tepla, tj. kromě sdílení tepla dotykem se začíná uplatňovat i sdílení tepla sáláním. Tepelný tok sálání tepla z odlitku do formy lze určit na základě Stefan-Boltzmannova zákona [2], [4]:

$$q_s = \alpha_s \cdot (T_{PO} - T_{PF}) = C / [(T_{PO}/100)^4 - (T_{PF}/100)^4], \quad (2.7)$$

kdy celkový součinitel přestupu tepla $\underline{\alpha}$ je: $\alpha = \alpha_s + \alpha_D, \quad (2.8)$

kde značí: α_s - součinitel přestupu tepla sáláním [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$];

α_D - součinitel přestupu tepla dotykem [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$];

C - součinitel sálání [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$];

T_{PO} - teplota povrchu odlitku [K];

T_{PF} - teplota povrchu formy [K].

Mezera se nevytváří rovnoměrně kolem celého odlitku, ale především na plochách ve směru největšího odvodu tepla. Jak již bylo řečeno, hlavním důvodem vzniku plynové vrstvy je lineární smršťování odlitku a roztahování formy. Mimo to se na jejím vzniku podílí i vedlejší činitele, kterými jsou konstrukce, počáteční teplota, tloušťka nátěru líce kovové formy a způsob odlévání.

Mezera z hlediska intenzity přenosu tepla vytváří přechodový tepelný odpor

mezery TPO_M (2.9), který ovlivňuje součinitel přestupu tepla, resp. prostupu tepla v mezeře β_M [1], [3]:

$$TPO_M = \frac{1}{\beta_M}, \quad (2.9)$$

kde značí: β_M - součinitel prostupu tepla v mezeře [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$].

Ve skutečnosti je problematika tepelného přechodového odporu mezery mnohem složitější. Po odlití taveniny do kovové formy vzniká mezi nimi počáteční přechodový odpor $TPO_{POČ}$, jehož velikost je závislá na počáteční teplotě, kvalitě líce formy a jejím materiálu. V důsledku vzniku plynové vrstvy vzniká další složka tepelného přechodového odporu TPO_P . Na velikosti tepelného přechodového odporu mezery TPO_M se ještě podílí odpor od zoxidovaného povrchu odlitku TPO_{OV} a složka od nátěru líce formy TPO_N . Celkový přechodový odpor mezery TPO_M je potom dán součtem jednotlivých složek [1], [2]:

$$TPO_M = TPO_{POČ} + TPO_P + TPO_{OV} + TPO_N, \quad (2.10)$$

kde značí: $TPO_{POČ}$ - počáteční přechodový tepelný odpor [$(W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1})^{-1}$];

TPO_P - odpor způsobený vznikem plynové vrstvy [$(W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1})^{-1}$];

TPO_{OV} - odpor od zoxidovaného povrchu odlitku [$(W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1})^{-1}$];

TPO_N - složka od nátěru [$(W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1})^{-1}$].

Na základě fyzikálních poznatků lze stanovit vztah pro výpočet součinitele prostupu tepla v mezeře [2]:

$$\beta_M = \frac{\lambda_{OV}}{X_{OV}} + \frac{\lambda_P}{X_P} + \alpha_s + \frac{\lambda_N}{X_N}, \quad (2.11)$$

kde značí: λ_{OV} - součinitel tepelné vodivosti oxidické vrstvy odlitku [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$];

λ_P - součinitel tepelné vodivosti plynové vrstvy [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$];

λ_N - součinitel tepelné vodivosti nátěru [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$].

Součinitel sálání v plynové vrstvě lze odvodit na základě rovnosti tepelných toků v plynové vrstvě vlivem přestupu tepla sáláním s uplatněním Stefan-Boltzmannova zákona:

$$\alpha_s = 0,04 \cdot (T_{STR}/100)^3, \quad (2.12)$$

kde značí: $T_{STŘ}$ - střední teplota, ve zjednodušeném případě $T_{STŘ} = (T_{PO} - T_{PF})/2$ [K].

Velmi často se používá tzv. efektivní součinitel prostupu tepla mezery β_M :

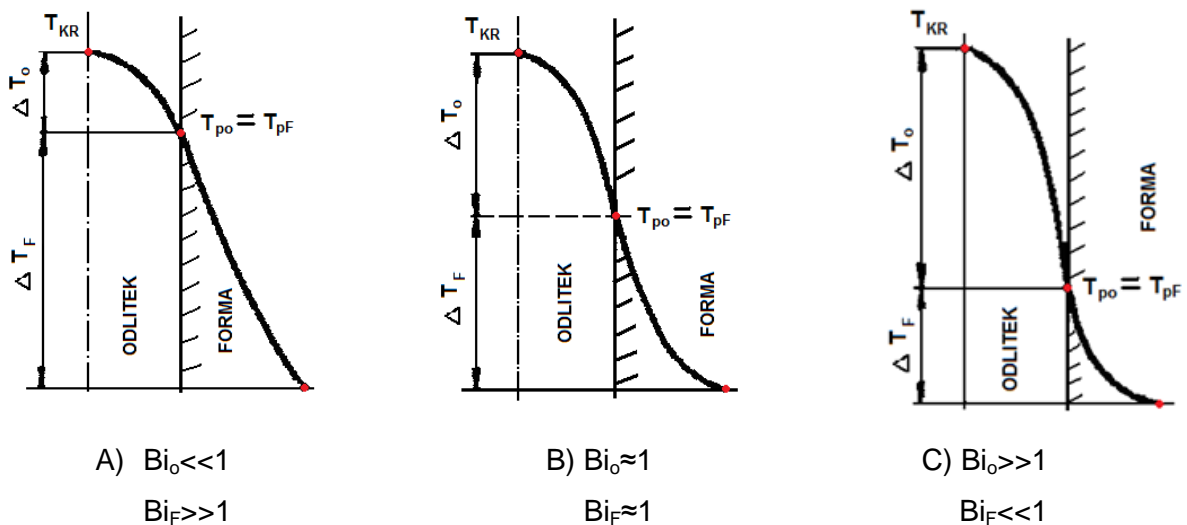
$$\beta_M = \alpha_1 + \frac{\lambda_{OV}}{X_{OV}} + \frac{\lambda_P}{X_P} + \alpha_S + \frac{\lambda_N}{X_N} + \alpha_2, \quad (2.13)$$

kde značí: α_1 - součinitel přestupu tepla na hranici neoxidické a oxidické vrstvy odlitku [W.m⁻².K⁻¹];

α_2 - součinitel přestupu tepla na hranici nátěru a kovové formy [W.m⁻².K⁻¹].

2.1.3 Intenzita přestupu tepla mezi odlitkem a formou

Za předpokladu **těsného styku** mezi odlitkem a formou je intenzita přestupu tepla charakterizována tzv. **Biotovým kritériem**. Biotovo kritérium charakterizuje výměnu tepla mezi styčnými povrchy odlitku a formy, resp. mezi teplotním polem odlitku a podmínkami sdílení tepla na jeho povrchu, nebo udává závislost mezi teplotním polem slévárenské formy a podmínkami sdílení tepla na jejím povrchu. Pro případ stacionárního sdílení tepla je Biotovo kritérium rovno poměru teplotního rozdílu v tělese a na jeho povrchu [1]



Obr. 2.6 Schématické znázornění Biotova kritéria pro odlitek a formu

Na základě odvození z obr. 2.6 lze stanovit Biotovo číslo pro odlitek:

$$Bi_o = \frac{\Delta T_o}{\Delta T_F} = \frac{X_o}{\frac{\lambda_o}{\alpha_D}}, \quad (2.14)$$

a analogicky pro formu:

$$Bi_F = \frac{\Delta T_F}{\Delta T_o} = \frac{X_F}{\frac{\lambda_F}{\alpha_D}}, \quad (2.15)$$

kde značí: ΔT_o - rozdíl teplot v odlitku [K];

ΔT_F - rozdíl teplot ve formě [K];

λ_o - součinitel tepelné vodivosti odlitku [$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$];

λ_F - součinitel tepelné vodivosti formy [$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$].

Podle velikosti Biotova kritéria mohou nastat tři případy intenzity přestupu tepla:

- a) $Bi_o \ll 1$ - to znamená, že tepelná propustnost styku odlitek-forma (α_D) je v porovnání s tepelnou propustností materiálu odlitku (λ_o/x_o) velmi malá, tepelná vodivost materiálu odlitku převládá nad přestupem tepla z odlitku do formy tak, že v příčném řezu odlitku se vytváří mírný teplotní gradient. Tento případ odpovídá podmínkám vytvořeným v pískové formě, viz obr. 2.6 A.
- b) $Bi_o \approx 1$ - to znamená, že tepelná propustnost rozhraní odlitek-forma (α_D) je podobná tepelné propustnosti odlitku (λ_o/x_o), v příčném průřezu odlitku se vytváří stejný teplotní gradient jako ve formě, což odpovídá podmínkám v nechlazené kovové formě, viz obr. 2.6 B.
- c) $Bi_o \gg 1$ - v tomto případě je tepelná propustnost rozhraní odlitek-forma (α_D) velká v porovnání s tepelnou propustností odlitku (λ_o/x_o), tepelná vodivost odlitku (λ_o) nestačí v průřezu odlitku vyrovnávat teploty a v příčném řezu odlitku se vytváří velmi strmý teplotní gradient a teplotní rozdíly v odlitku jsou velké, to odpovídá podmínkám v intenzivně chlazené kovové formě, viz obr. 2.6 C.

V soustavě **odlitek-mezera-kovová forma** závisí intenzita přestupu tepla na tepelných podmínkách této soustavy. Na základě rovnice teplotní rovnováhy mezi jednotlivými složkami soustavy lze odvodit **tepelná kritéria K**, která jsou analogická s Biotovým kritériem a vyjadřují intenzitu výměny tepla přes mezeru. Pro ochlazování odlitku lze kritérium vyjádřit rovnicí (2.16) [1], [2].

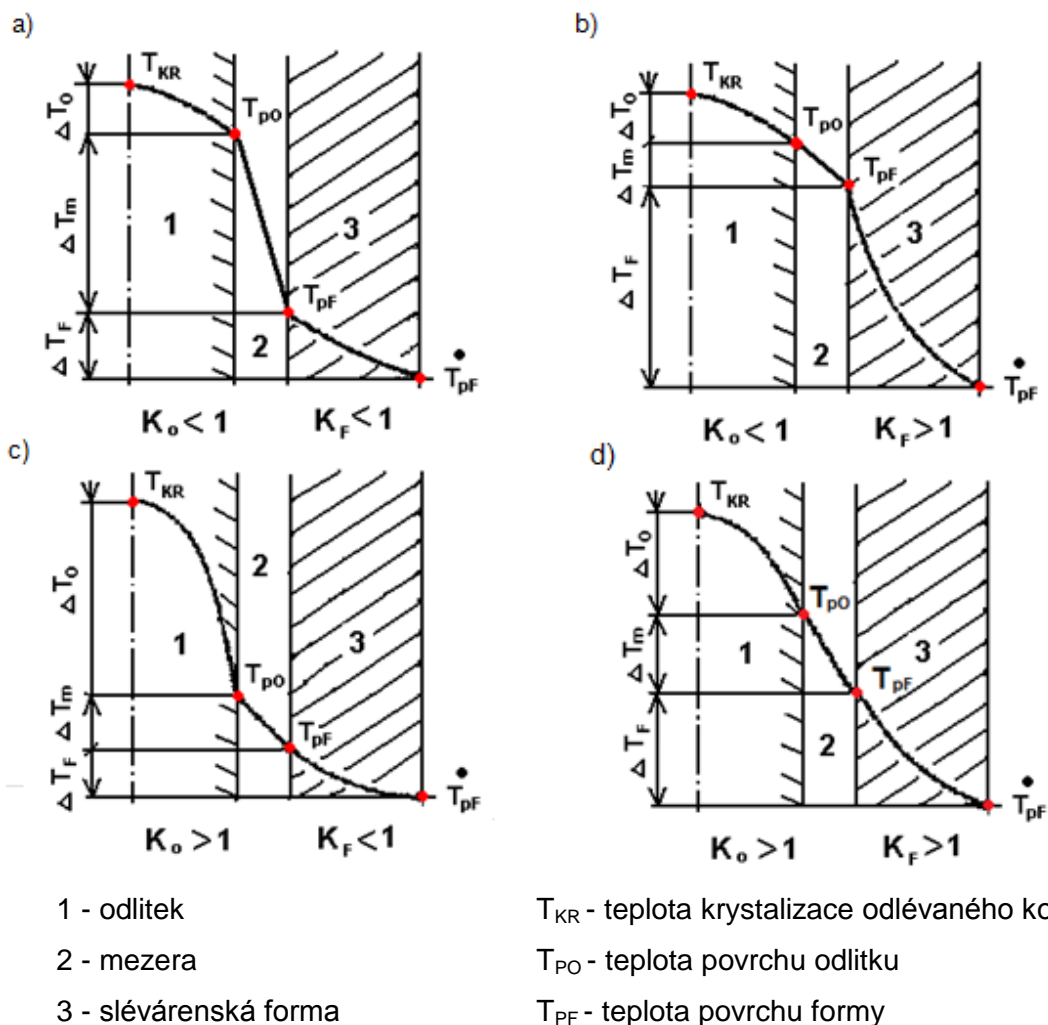
$$K_o = \beta \cdot \frac{X_o}{\lambda_o} = \frac{T_{KR} - T_{PO}}{T_{PO} - T_{PF}} = \frac{\Delta T_o}{\Delta T_M}, \quad (2.16)$$

a analogicky pro formu rovnicí:

$$K_F = \beta \cdot \frac{X_F}{\lambda_F} = \frac{T_{PF} - T_F}{T_{PO} - T_{PF}} = \frac{\Delta T_F}{\Delta T_M}, \quad (2.17)$$

kde značí: T_F - počáteční teplota formy [K];

ΔT_M - rozdíl teplot v mezeře [K].



Obr. 2.7 Zobrazení průběhu teplot v odlitku a kovové formě

Podle velikosti kritéria K (2.16, 2.17) mohou nastat tyto případy intenzity přestupu tepla přes mezeru, viz obr. 2.7:

- 1) $K_o < 1$, $K_F < 1$ - intenzita ochlazování odlitku a prohřívání formy je malá, tento

případ nastává při vysoké hodnotě λ_O a λ_F a nízké hodnotě β (mezera má velký tepelný přechodový odpor - viz obr. 2.7 a).

- 2) $K_O < 1$, $K_F > 1$ - intenzita ochlazování odlitku je malá, intenzita prohřívání formy je velká, to nastává při vysoké hodnotě λ_O , nízké hodnotě λ_F a střední hodnotě β (mezera má střední tepelný přechodový odpor - viz obr. 2.7 b).
- 3) $K_O > 1$, $K_F < 1$ - intenzita ochlazování odlitku je velká, intenzita prohřívání formy je malá, to souvisí s nízkou hodnotou λ_O , vysokou hodnotou λ_F a střední hodnotou β (mezera má střední přechodový tepelný odpor - viz obr. 2.7 c).
- 4) $K_O > 1$, $K_F > 1$ - intenzita ochlazování odlitku a prohřívání formy je velká, to souvisí s nízkou hodnotou λ_O a λ_F a vysokou hodnotou β (mezera má malý tepelný odpor - viz obr. 2.7 d).

2.1.4 Sdílení tepla ve slévárenské formě

Teplo, které prošlo z odlitku do formy, způsobuje intenzivní prohřátí její povrchové vrstvy a ve formě se vytváří tepelný tok od líce do hloubky stěny formy. Schopnost slévárenské formy akumulovat teplo z tuhnoucího, popř. chladnoucího odlitku, závisí nejen na materiálových vlastnostech odlévané slitiny a formy, ale také na přestupu tepla mezi odlitkem a formou, popř. na výměně tepla mezi formou a okolím. Množství tepla, které je forma schopna akumulovat lze obecně vyjádřit vztahem:

$$Q_F = V_F \cdot c_F \cdot \rho_F \cdot T_{STR}, \quad (2.18)$$

kde značí: V_F - objem formy [m^3];

c_F - měrná tepelná kapacita formy [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$];

ρ_F - hustota formy [$kg \cdot m^{-3}$].

Přenos tepla uvnitř formy závisí na jejím typu. V kovové slévárenské formě, která je poměrně homogenní, se teplo šíří vedením. U pískových forem je situace poměrně složitější [2], [4].

Jak již bylo uvedeno, tepelné děje, které probíhají v soustavě odlitek-forma v průběhu tuhnutí a chladnutí odlitku, jsou děje nestacionární (závislé na čase).

V libovolném okamžiku každému místu formy přísluší určitá teplota, která je závislá především na vlastnostech odlévané slitiny a dále na materiálu, styčném povrchu (líci) a na konstrukčních faktorech formy. Souhrn těchto teplot v určitém časovém okamžiku udává teplotní pole, které lze formálně popsat rovnicí (2.19) [1].

$$T = f(x, y, z), \quad (2.19)$$

kde značí: x, y, z - souřadnice uvažovaného bodu.

Nestacionární vedení tepla popisuje parciální diferenciální rovnice (2.20), která matematicky představuje popis časové změny teploty v libovolném místě tělesa.

 (2.20)

kde značí: $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$ - součinitel tepelné vodivosti ve směrech x, y, z [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$];

c_v - měrná tepelná kapacita za stálého objemu [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$];

q_v - tepelný výkon vnitřních zdrojů (uvolňováno při fázových přeměnách) [J].

Řešení rovnice (2.20) je velmi obtížné, tato obtížnost souvisí se správnou formulací počáteční a okrajové podmínky. Při výpočtech této rovnice v podmínkách tuhnutí a chladnutí odlitků je nutné uvažovat teplotní závislost termofyzikálních vlastností materiálu jak slévárenské formy, tak odlévané slitiny. Pokud jde o aplikaci rovnice (2.20) při sdílení tepla mezi odlitkem a slévárenskou formou, nejsou zahrnuti důležití činitelé, jako je např. konvekční proudění kovu ve formě, popř. vliv mezery mezi odlitkem a formou [1].

Rozložení teplot ve formě za předpokladu její homogenity popisuje Fourierova diferenciální rovnice sdílení tepla:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \cdot \left[\frac{\partial}{\partial x} \cdot \lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \cdot \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \cdot \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} + q_{ZDR} \right], \quad (2.21)$$

kde značí: q_{ZDR} - teplo uvolněné z vedlejších zdrojů [J];

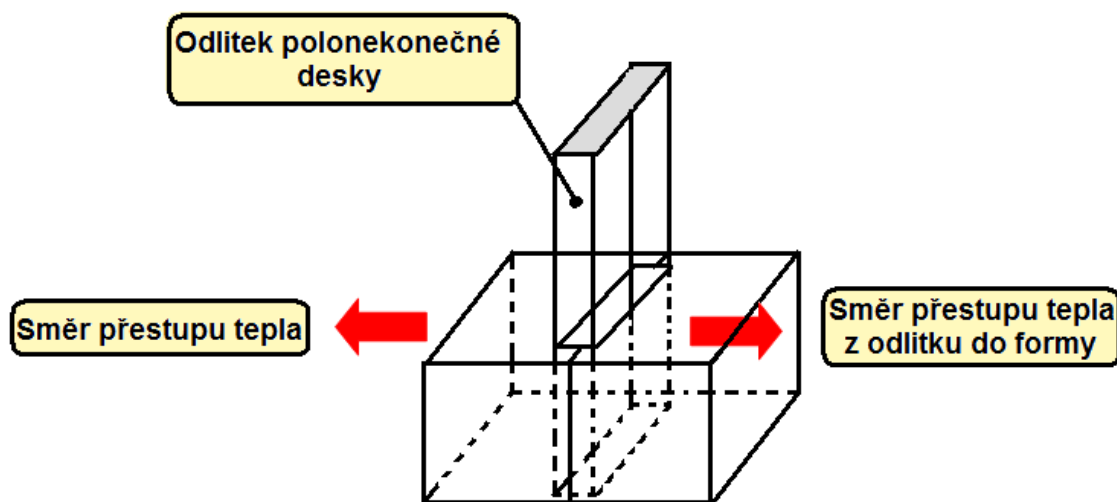
a - součinitel teplotní vodivosti [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$].

Výpočet této rovnice je složitý, poněvadž je nutné znát okrajové a počáteční podmínky. Právě proto se tento výpočet zjednodušuje zavedením předpokladu jednosměrného vedení tepla (teplo ve formě probíhá nejintenzivněji v jednom směru). Potom se rovnice (2.21) zjednoduší na tvar (2.22).

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right), \quad (2.22)$$

Analytické řešení této rovnice vychází ze zjednodušujících předpokladů, které jsou:

- a) forma i odlitek představují polonekonečné prostory, viz obr. 2.8;
- b) tavenina kovu tuhne při konstantní teplotě;
- c) teplota styku taveniny s formou je konstantní během celého tuhnutí odlitku;
- d) uvažujeme pouze krystalizační teplo tuhnutí, neuvažujeme přehřátí taveniny ani odvod tepla ze ztuhlého kovu;
- e) tepelně-fyzikální veličiny odlévaného kovu se během tuhnutí považují konstantní [1].



Obr. 2.8 Odlitek a slévarenská forma znázorňující polonekonečný prostor

Rovnici (2.22) řešíme pomocí Gaussova integrálu chyb, viz obr. 2.9. Po úpravách dostaneme vztah pro výpočet teploty v libovolném místě slévarenské formy [1], [5]:

$$T_{F(x,t)} = T_{PR} - (T_{PR} - T_F) \cdot \operatorname{erf} \left[\frac{x}{2 \cdot \sqrt{a_F \cdot t}} \right], \quad (2.23)$$

kde značí: T_{PR} - teplota rozhraní odlitek - forma [K];

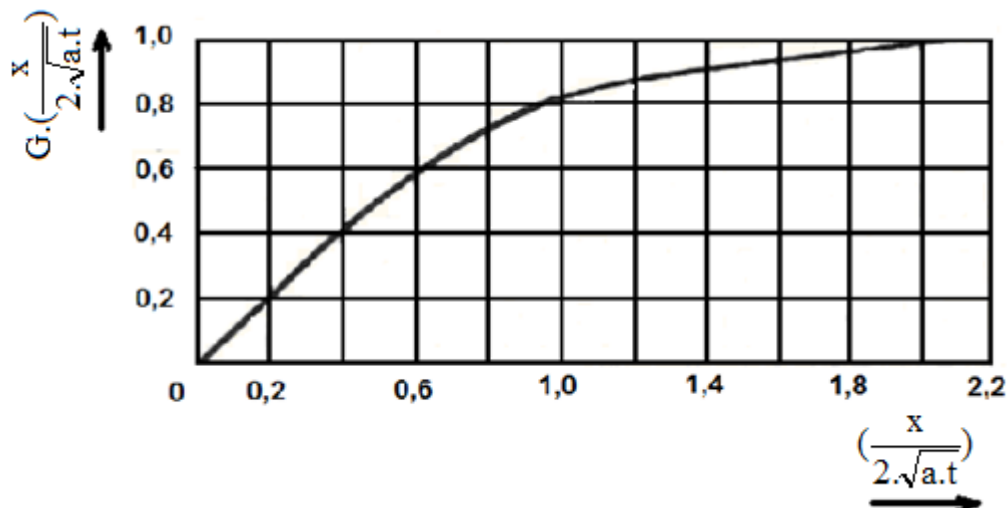
T_F - počáteční teplota formy [K];

a_F - součinitel teplotní vodivosti formy [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$];

x - vzdálenost v tělese od nahřívajícího povrchu [m];

t - čas [s];

erf - argument Gaussova integrálu chyb.



Obr. 2.9 Diagram hodnot Gaussova integrálu a jeho argumenty

Jak již bylo uvedeno, teplotní pole slévárenské formy, resp. odlitku, závisí především:

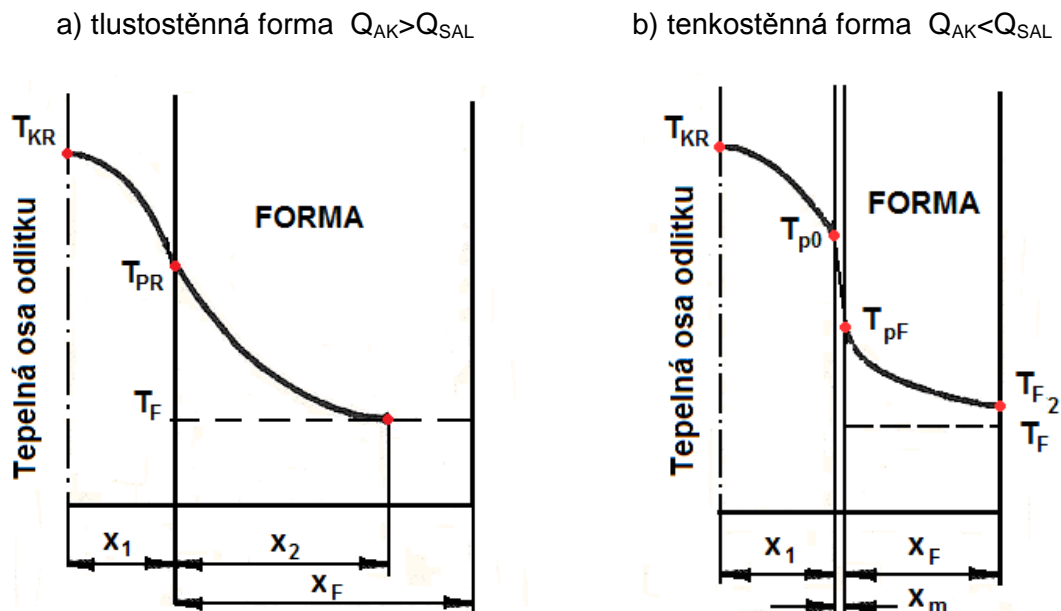
- Na vlastnostech odlévané slitiny** - slitiny s vysokou hodnotou měrné tepelné kapacity c se ohřívají a chladnou za jinak stejných podmínek pomaleji, než slitiny s nízkou měrnou tepelnou kapacitou. To značí, že ve slitinách s vysokou měrnou tepelnou kapacitou se nevytváří za jinak stejných podmínek tak značná nehomogenita teplotního pole odlitku jako u slitin s nízkou hodnotou této veličiny. Ve stejném smyslu působí i hustota slitiny. Její vysoká hodnota znamená nižší stupeň heterogenity teplotního pole odlitku. Stupeň heterogenity závisí na měrné tepelné kapacitě c a na hustotě taveniny ρ . Přitom však není možno opomenout vliv tepelné vodivosti slitiny. Tato materiálová veličina je jistým měřítkem rychlosti rozvádění tepla uvnitř prostředí, respektivě v odlitku. Podobně jako pro slévárenskou formu, lze i pro odlitek definovat součinitel tepelné akumulace $b_0 = (\lambda_0 \cdot c_0 \cdot \rho_0)^{1/2}$. Je to komplexní tepelně-fyzikální veličina, kterou nelze považovat za konstantu materiálu odlitku, neboť její jednotlivé složky se mění s místem, s časem a teplotou [1], [2].
- Na materiálu, styčném povrchu (líci) i na konstrukční řešení** - slévárenská forma je schopna díky své tepelné akumulaci teplo z odlitku odvádět, ale také akumulovat. Schopnost odvodu tepla z odlitku do formy je dána zejména tepelnou

vodivostí, měrnou tepelnou kapacitou a hustotou materiálu formy. Vysoká hodnota tepelné vodivosti formy způsobuje odvod tepla z povrchu odlitku směrem do stěny formy. Ochlazovací účinek formy vůči odlitku je komplexně charakterizován součinitelem tepelné akumulace formy b_f (2.24), který představuje množství tepla prošlé jednotkou plochy slévárenské formy za časovou jednotku a způsobí rozdíl teplot o 1K [1], [2].

$$b_f = \sqrt{\lambda \cdot c \cdot \rho}, \quad (2.24)$$

Schopnost formy akumulovat teplo z tuhnoucího odlitku je závislá jak na tepelně-fyzikálních vlastnostech odlévané slitiny, tak na tepelně-fyzikálních vlastnostech slévárenské formy, ale také na výměně tepla mezi formou a okolím.

U kovových forem důležitou roli sehrává i jejich tloušťka, viz obr. 2.10. Tloušťka stěny kovové formy souvisí i s jejími dilatačními a deformačními vlastnostmi, které přispívají ke vzniku plynové vrstvy mezi odlitkem a formou. Bylo prokázáno, že při odlévání tenkostěnných odlitků do tlustostěnné kovové formy se během tuhnutí plynová vrstva prakticky netvoří. Také při tuhnutí velmi členitých tenkostěnných odlitků není vznik mezery zřejmý. To lze vysvětlit tím, že tyto odlitky neprohřejí formu natolik, aby byla způsobena její dilatace. Čím je tlustší stěna formy, tím akumuluje více tepla. To je způsobeno tím, že má větší tepelnou kapacitu. Stejně tlustá forma má vyšší tepelnou kapacitu, čím má vyšší hodnotu tepelné akumulace b_f . Čím je vyšší b_f , tím forma intenzivněji odnímá teplo z tuhnoucího odlitku, ale její teplota je nižší než u formy s nižší hodnotou b_f . Současně velikou roli hraje i počáteční teplota formy, neboť podle ní se řídí i výchozí tepelná kapacita formy [4], [5].



X_1 - charakteristický rozměr odlitku [m];

X_2 - tloušťka prohřáté vrstvy formy v okamžiku ztuhnutí odlitku [m];

X_m – mezera [m];

X_F - tloušťka stěny formy [m].

Obr. 2.10 Rozložení teplot v tenkostěnné a tlustostěnné slévárenské formě

2.1.5 Přestup tepla z formy do okolí

V okamžiku vytvoření teplotního spádu mezi tuhnoucí taveninou a formou dochází mezi nimi k výměně tepla. Kolik tepla forma akumuluje a kolik předá okolí, je při jinak srovnatelných podmínkách tuhnutí odlitku závislé na tloušťce kovové formy.

Bylo zjištěno, že čím je menší tloušťka stěny kovové formy, tím je vyšší teplota na vnějším povrchu formy a přestup tepla do okolí je vysoký. Zvýší-li se tloušťka stěny kovové formy, pak se sníží hodnota teploty vnějšího povrchu formy, čímž se sníží přestup tepla do okolí a forma akumuluje více tepla. Teplo z vnějšího povrchu formy přechází do okolního prostředí sáláním a jeho množství lze vyjádřit vztahem [1], [2]:

$$Q_{SÁL} = \alpha_{SÁL} \cdot (T_{F2} - T_{OK}) \cdot S_V \cdot t, \quad (2.25)$$

kde značí: $\alpha_{SÁL}$ - součinitel přestupu tepla z vnějšího povrchu formy do okolí [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$];

T_{F2} - teplota vnějšího povrchu formy [K];

T_{OK} - teplota okolí [K];



S_V - vnější povrch formy [m^2];

t - čas [s].

2.2 Tepelně-fyzikální veličiny slévárenských forem

K výpočtu tepelných procesů mezi odlitkem a slévárenskou formou je nutné znát jejich tepelně-fyzikální veličiny. Tyto veličiny je možno rozdělit do dvou skupin.

1) Základní materiálové veličiny:

a) měrná tepelná kapacita c [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$];

b) tepelná vodivost λ [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$];

c) součinitel přestupu tepla α [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$];

d) součinitel prostupu tepla β [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$].

2) Veličiny odvozené ze zákonů přestupu tepla:

a) teplotní vodivost a [$m^2 \cdot s^{-1}$];

b) součinitel tepelné akumulace b_f [$W \cdot s^{1/2} \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$].

Výše uvedené veličiny jsou závislé jak na teplotě, tak také i na skupenství. Jejich matematická závislost na teplotě je velmi složitá, proto je pro určitý teplotní interval experimentálně stanovena střední hodnota.

2.2.1 Měrná tepelná kapacita

Jedná se o fyzikální veličinu charakterizující materiál, která udává množství tepla, jež je nutno dodat látce o jednotkové hmotnosti, abychom 1kg této látky ohřáli o 1K (2.26). Jde v podstatě o energii, kterou mřížka materiálu odebírá z teplejšího okolí. Důsledkem je pak nárůst teploty tohoto materiálu. Tato veličina je závislá jak na teplotě, tak i na stavu látky (na skupenství). Se zvyšující se teplotou c roste [1].

$$c = \frac{dQ}{dT \cdot m}, \quad (2.26)$$

kde značí: dQ - přírůstek množství tepla [J].

Rozlišujeme měrnou tepelnou kapacitu za stálého objemu c_V a za stálého tlaku c_P . Tyto veličiny jsou závislé na teplotě, tedy můžeme psát vztah (2.27).

$$c = A + B \cdot T + C \cdot T^2, \quad (2.27)$$

kde značí: A , B , C - materiálové konstanty.

2.2.2 Součinitel tepelné vodivosti

Je fyzikálně-tepelná veličina látky, která udává pro určitý časový okamžik množství tepla, které projde jednotkou délky materiálu a vytvoří rozdíl teplot o 1K. Tuto veličinu používáme při výpočtech vedení tepla v odlitku jak ve stavu tekutém, tak ve stavu tuhém, dále při vedení tepla ve slévárenské formě popř. v mezeře při přestupu tepla z odlitku do slévárenské formy přes tuto mezeru. Součinitel tepelné vodivosti je závislý na mnoha faktorech, např.: na vlhkosti, hmotě, struktuře apod. Její stanovení je náročné. Tepelná vodivost u většiny látek závisí na teplotě, u některých látek je závislá na teplotě lineárně (2.28) [5].

$$\lambda = \lambda_0 \cdot (1 + b \cdot T), \quad (2.28)$$

kde značí: λ_0 - součinitel tepelné vodivosti při teplotě 0°C [W.m⁻¹.K⁻¹];

b - konstanta.

2.2.3 Součinitel teplotní vodivosti

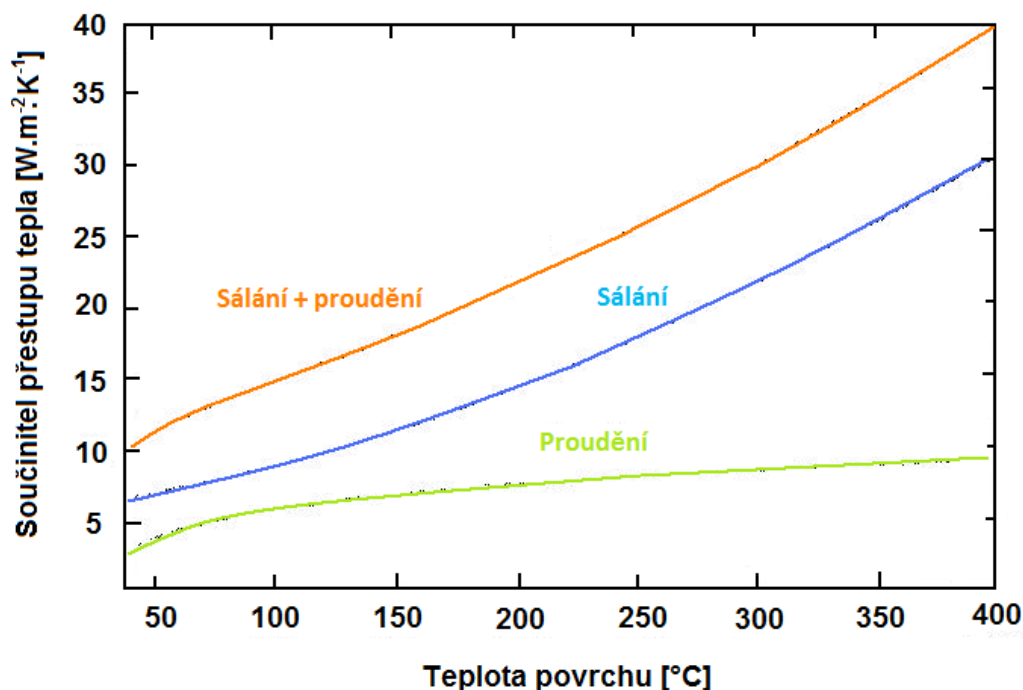
Tato tepelně fyzikální veličina má v podstatě stejný význam jako součinitel tepelné vodivosti, pouze s tím rozdílem, že součinitel teplotní vodivosti je měřítkem nestacionárních dějů. Znamená to, že se při výpočtech s použitím tohoto součinitele bere v úvahu proměnlivost teplotního pole a tepelného obsahu sledovaného objektu s časem. Výpočet tohoto součinitele je uveden v experimentální části této diplomové práce v kapitole 3.3.2 (3.2).

Součinitel teplotní vodivosti je přímo úměrný součiniteli tepelné vodivosti a nepřímo úměrný součinu c.p, což je někdy označováno jako objemová měrná tepelná kapacita c_V . Vyjadřuje tedy, podobně jako λ pro ustálené děje, schopnost tělesa vyrovnávat teplotu ve svém objemu. Čím vyšší je teplotní vodivost materiálu, tím rychleji se v něm vyrovnávají teplotní rozdíly [1], [2].

2.2.4 Součinitel prostupu a přestupu tepla

Součinitel prostupu tepla β charakterizuje přenos tepla prostupem z teplejší do chladnější tekutiny vzájemně od sebe oddělených stěnou. Je důležitou veličinou při sdílení tepla v soustavě odlitek-mezeře-forma (2.11), (2.13). Tento součinitel vyjadřuje množství tepla, které je postupně přeneseno za jednotku času plochou S mezi odlitkem a formou při rozdílu teplot o 1K.

Součinitel přestupu tepla α je mírou intenzity přestupu tepla z teplejšího do chladnějšího prostředí. Závisí na veličinách, které určují fyzikální vlastnosti. Má veliký význam při sdílení tepla prouděním, viz obr. 2.11. Týká se především kapalin a plynů, kdy přestup tepla je z tekutiny do stěny nebo naopak. Určení tohoto součinitele výpočtem je velmi obtížné, proto se určuje empiricky. Při přestupu tepla z odlitku do formy součinitel přestupu tepla α_D ovlivňuje teplotu taveniny, rychlost proudění taveniny, teplotu povrchu aj. Situace je ještě složitější při gravitačním lití do formy, kdy se mezi odlitkem a formou vytváří mezera [1], [5].



Obr. 2.11 Závislost součinitele přestupu tepla sáláním a prouděním na teplotě

2.2.5 Součinitel tepelné akumulace

Tento součinitel komplexně charakterizuje ochlazovací účinek slévárenské formy vůči danému odlitku z určitého materiálu a je závislý na tvaru a použitém materiálu odlitku. Představuje množství tepla, která projde jednotkou plochy slévárenské formy za časovou jednotku a způsobí rozdíl teplot o 1K. Jeho matematický vztah je znázorněn v kapitole 2.1.4 rovnice (2.24). Tato formulace je poměrně jednoduchá, přesto stanovení pro konkrétní odlitek i formu jsou složitá, vzhledem k vlivu teploty na jednotlivé fyzikální vlastnosti formy [1], [5].

2.3 Slévárenské simulační programy

Počítačová simulace slévárenských technologických a metalurgických procesů v posledních deseti letech velmi pozitivně ovlivnila rozvoj slévárenství. Možnost předcházet technologickým vadám se projevila na výsledné kvalitě odlitků. Obecně lze počítačovou simulaci označit jako vysoce účinný nástroj optimalizace procesů a dějů s využitím vysoce výkonných počítačů.

V 60. letech se při řešení některých úloh nestacionárního sdílení tepla a hmoty začaly uplatňovat analogové počítače. V 80. letech se objevily první slévárenské simulační softwary zaměřené na tuhnutí odlitků. Dnes nacházíme na evropském trhu celou řadu slévárenských komplexních simulačních programů, viz tab. 2.1, které dávají uživateli možnosti řešení různých úloh, stále se inovují a doplňují. Simulační programy se dnes orientují zejména na řešení těchto hlavních problémů:

- a) plnění forem;
- b) tuhnutí a chladnutí odlitků (ve formě i po vyjmutí z formy);
- c) vznik struktury a utváření vlastností odlitku;
- d) vznik vnitřních pnutí a deformací, popř. sledování struktury.

Kvalita simulačních programů, jejich vypovídající hodnota a míra shody výsledků simulace s realitou jsou dány zejména těmito okolnostmi:

- A) kvalitou matematického popisu dílčích dějů - tj. rozpracováním Fourierovy diferenciální rovnice vedení tepla, včetně správné volby počátečních a okrajových podmínek;
- B) zahrnutím odchylky chování a stavu odlévaného materiálu od ideálního předpokladu jednofázového stavu taveniny (např. nenewtonská kapalina, teplotní závislost postupného uvolňování latentního tepla při tuhnutí taveniny atd.);
- C) tepelně-fyzikálním definováním vlastností forem i odlévaného materiálu v závislosti na teplotě v celé potřebné šíři teplotního intervalu.

Tab. 2.1 Příklady simulačních programů

Název simulačního programu	Země původu	SIMULAČNÍ VÝPOČET ZAHHRNUJE			
		Plnění formy	Tuhnutí a chladnutí	Zbytkové pnutí	Struktura odlitku
NOVA FLOW	Švédsko	✓	✓	-	✓
NOVA SOLID	Švédsko	✓	✓	-	✓
FLOW 3D	USA	✓	✓	-	✓
PROCAST™	USA	✓	✓	✓	✓
FORECAST™	Kanada	✓	✓	✓	✓
PAM-CAST™	Francie	✓	✓	-	✓
RAPID/CAST	USA	✓	✓	✓	✓
SIMTEC	Německo	✓	✓	✓	✓
MAGMA SOFT	Německo	✓	✓	✓	✓

Kromě toho je také důležité, jakým způsobem tyto simulační programy definují proudění kapaliny pomocí rovnice kontinuity a Navier-Stokesova zákona o zachování hybnosti, definují tuhnutí a chladnutí odlitků Fourierovou diferenciální rovnicí pro přenos tepla, definují úroveň zbytkových či vnitřních pnutí zákony mechaniky tuhého tělesa při plastické a elastické deformaci atd. S tím je spojeno i stanovení výchozích a okrajových podmínek řešení. Poměrně velkým problémem při simulačních výpočtech je stanovení hodnot potřebných tepelně-fyzikálních veličin v závislosti na teplotě. Toto je nejčastější příčinou rozdílů mezi výsledky získanými simulačním výpočtem a experimentálním měřením při srovnatelných podmínkách [7].

2.3.1 Principy simulačních programů

Řešení tepelných úloh v systémech s rozloženými parametry lze provést:

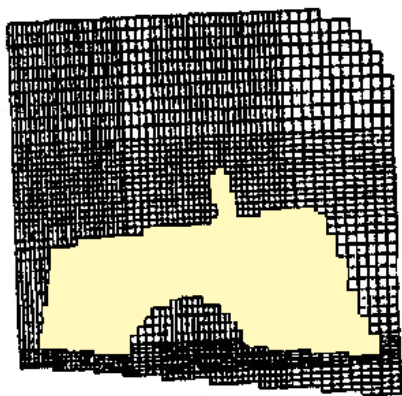
- analyticky;
- numericky;
- experimentálně.

V počítačových simulačních výpočtech tepelných dějů mezi odlitkem a slévárenskou formou mají největší uplatnění numerické metody. Jejich podstata

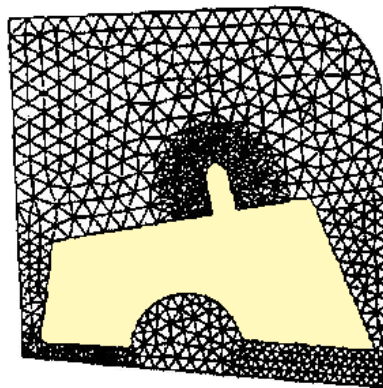
spočívá na diskretizaci proměnných, k čemuž přispívá typická opakovatelnost jednoduchých algebraických operací určitého typu. Jejich předností je to, že umožňují získat řešení tepelné úlohy v konečném počtu diskrétních míst zvolené diferenční sítě nebo sítě konečných prvků, a to buď v celé oblasti nebo její povrchové části. Mezi tyto metody lze zařadit metodu konečných prvků a metodu konečných diferencí.

Metoda konečných diferencí (MKD), mezinárodně označovaná FDM (Finite Differences Method), nebo-li metoda sítí, viz obr. 2.12 a), je založena na aproximaci základní diferenciální rovnice s příslušnými okrajovými podmínkami odpovídající diferenční rovnici, jež má tvar algebraických rovnic. Dokonalost aproximace spočívá v nahrazování derivace přesnějšími výrazy. Náhrada se provádí v diskrétních místech tvořených uzly sítě, které zahrnují zkoumanou oblast. Konečným výsledkem algebraických operací je určení teploty v daném uzlu sítě [1].

a)



b)



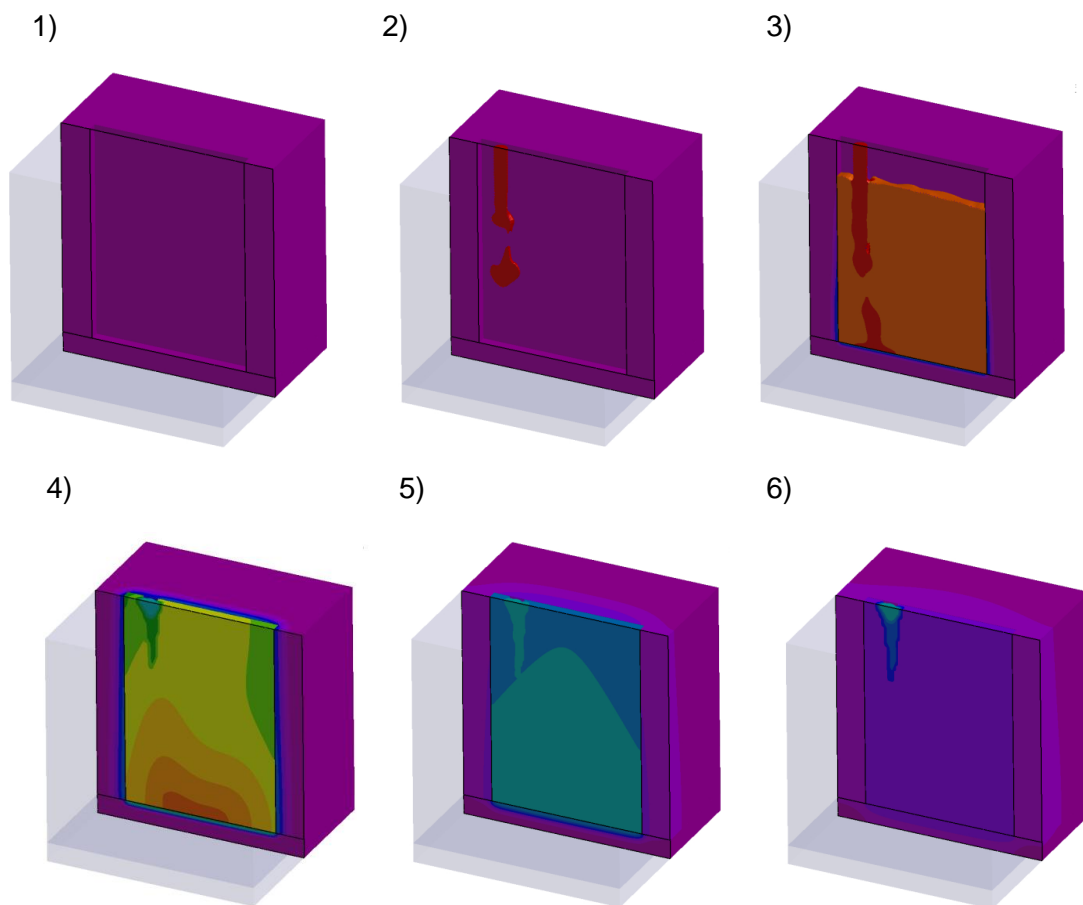
Obr. 2.12 Tvar elementů simulační sítě: a) metoda MKD, b) metoda MKP

Metoda konečných prvků (MKP), resp. mezinárodně označovaná FEM (Finite Element Method), je založena na rozdělení dané oblasti na konečný počet jednoduchých prvků (konečných prvků), o nichž předpokládáme, že jsou navzájem spojeny v konečném počtu uzlových bodů na hranicích prvků, viz obr. 2.12 b). Skutečný průběh vyšetřované fyzikální veličiny, resp. teploty uvnitř prvků, se při řešení aproximuje zvolenou funkcí, přičemž je nutné, aby tato funkce byla jednoznačně určena hodnotami veličiny v uzlových bodech. Tato metoda dovoluje lepší geometrický popis a vystižení okrajových podmínek při složitých tvarech integrační oblasti než předchozí metoda MKD [1].

Metoda CVM (Control volume method), jedná se o zvláštní variantu FDM, která se používá při zvláštních výpočtech teplotního a látkového přenosu. I když tato metoda není úplně akceptována po matematické stránce, (neboť se z části odvolává na intuitivní postupy), přeci se pomocí ní v numerických aplikacích řeší i velmi složité úlohy a to s vysokou přesností výsledků, které byly následně porovnány s experimenty. Metoda CVM transformuje různorodé technické úlohy, např. určení smrštění a vznik dutin v odlitku [6].

2.3.2 Simulace plnění formy

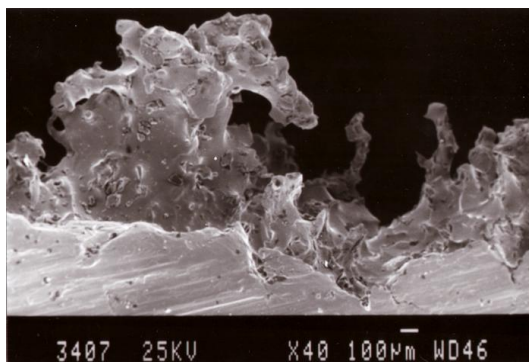
Moduly určené pro simulaci lití jsou programové soubory určené k simulaci prostorového proudění taveniny. Umožňují technologům simulovat průběh plnění dutin forem proudícím kovem, viz obr. 2.13. Lze je využít k simulaci gravitačního i tlakového lití. Systém je založen na společném řešení rovnic proudění a přenosu tepla. Počítá se s potenciálním prouděním nestlačitelné kapaliny. V úvahu se bere charakter proudění, třecí ztráty a gravitace. Algoritmus výpočtu pracuje s vysokou přesností, ale program je zároveň velmi rychlý a jednoduchý při použití. V úvahu se bere tuhnutí během lití a řešení je plně prostorové. Počítají se tlaková a teplotní pole během plnění a vektory rychlostí. Vizualizace výsledku je ve 2D nebo 3D formě včetně animace procesu. Může být prováděna po simulaci, ale také během ní. Analýza získaných dat umožní včas odhalit a odstranit vliv vysoké rychlosti a zavíření kovu (problém eroze forem), odhalit místa s podtlakem (přisávání vzduchu) ve vtokové soustavě nebo v odlitku místa, kde se kupí nezaběhnuté nečistoty, vznikají bubliny apod. [7], [8].



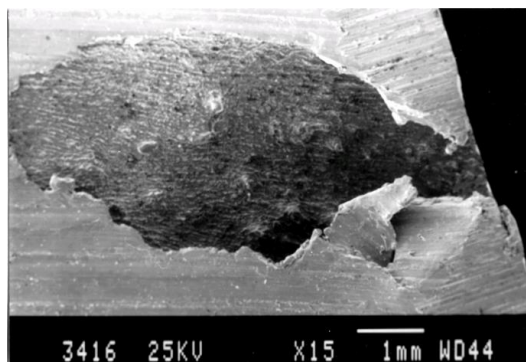
Obr. 2.13 Simulace plnění formy a přenos tepla z odlitku do formy

2.3.3 Simulace tuhnutí

Moduly určené pro simulaci tuhnutí jsou určeny pro prostorovou 3D simulaci tuhnutí odlitku. Kombinují konvekční tepelný výpočet s uvažováním toku kovu během tuhnutí. K dosažení přesných výsledků se bere v úvahu gravitace, změny v hustotě slitiny a změny v krystalografii odlitku při tuhnutí. Na jejich základě se provádí analýza velikosti a umístění vad odlitku jako jsou např. staženiny, bubliny, viz obr. 2.14 apod. Při výpočtu se vychází z konstantní teploty kovu a formy na počátku procesu nebo v případě integrace s moduly určené pro simulaci lité z teplotního pole po nalití. Do výpočtu je možné zahrnout vliv chladítek a chladicích kanálů, přehřívací elementy, izolační nátěry, obklady aj. Počítá se velikost vznikajících vzduchových mezer na základě zadané teplotní roztažnosti kovu a formy. Vizualizaci výsledků lze provést již v průběhu výpočtů. Umožňují zobrazit rozložení teplot, tekutou fázi, rozložení staženin a porezity ve 3D zobrazení nebo ve vybraném řezu odlitkem.



a) staženina



b) otevřená bublina

Obr. 2.14 Vady odlitků [9]

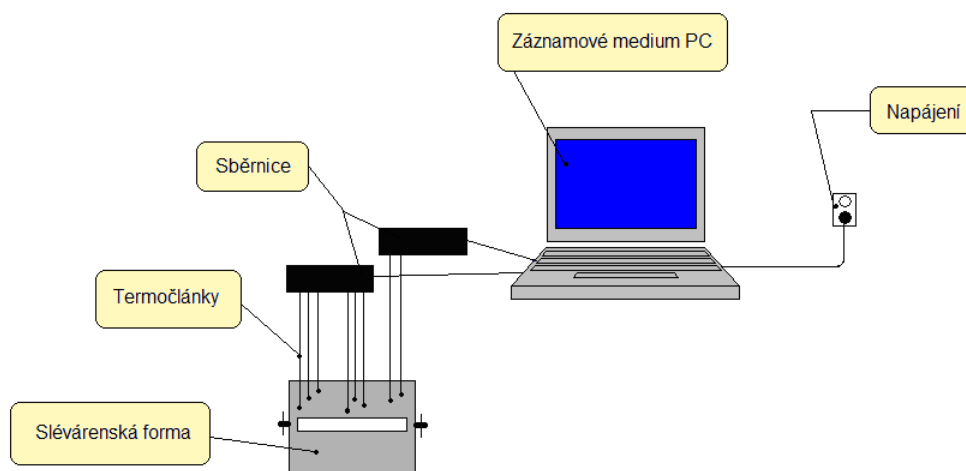
Pomocí simulačních programů je možné pozorovat průběh a dobu tuhnutí odlitku, vyhodnocovat kompletní teplotní pole v každé technologické části, intenzitu odvodu tepla, rozložení rychlostního a tlakového pole v odlitku. Je možné odhalit vady vzniklé v odlitku, mikroporozitu a staženiny. Lze také provést výpočet mechanických vlastností jako jsou např. HB, mez kluzu, pevnost a tažnost [7].

3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST PRÁCE

Experimentální část této diplomové práce je rozdělena na tři hlavní části. První část je tvořena měřením teplotních polí v soustavě odlitek (tvaru desky) - kovová forma. K zhotovení tohoto odlitku byla použita metoda gravitačního lití jak do studené, tak i do přehřáté slévárenské formy. Jako materiály pro výrobu odlitků byly zvoleny vybrané druhy slitin neželezných kovů. Druhá část této práce se zabývá simulováním teplotních polí těchto odlitků pomocí počítačového softwaru QuikCAST. V závěrečné části experimentu je uveden výpočet teplotních polí pomocí Gaussova integrálu chyb a porovnání naměřených a vypočtených hodnot teplot v daných místech kovové slévárenské formy v okamžiku ztuhnutí odlitku.

3.1 Popis experimentálního zařízení

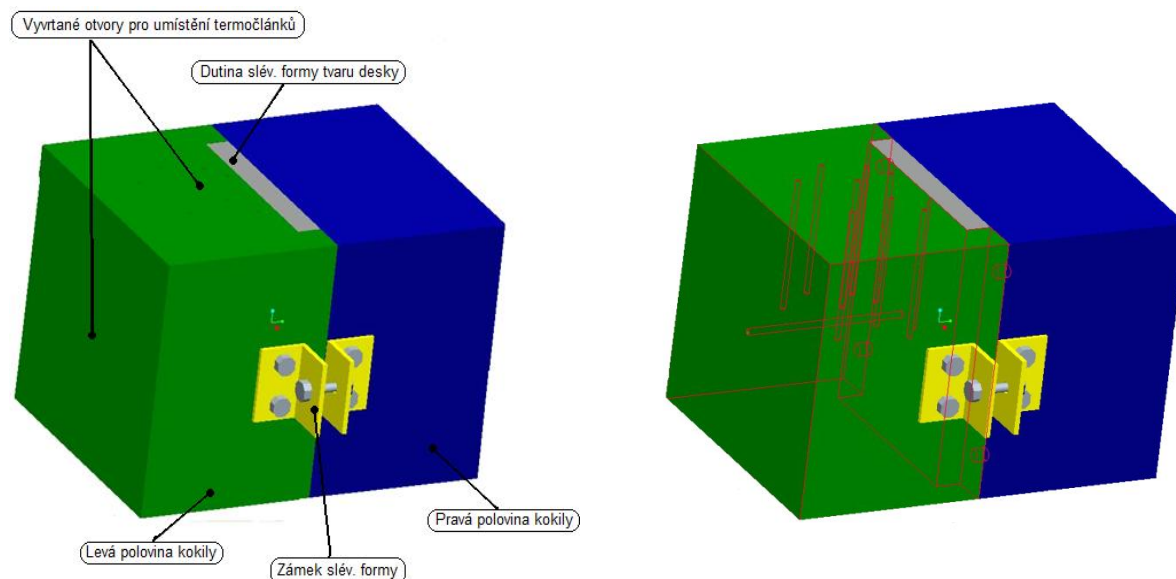
Experiment byl proveden ve školní slévárně Katedry strojírenské technologie TUL. Schéma experimentu je patrné z obr. 3.1. Pro tento experiment bylo nutné nejdříve zapojit záznamové medium PC, ke kterému byla připojena sběrnice dat OMEGA OMB-DAQ-55. Sběrnice dat byla spojena s termočlánsky, které se následně vkládaly do jednotlivých předem určených otvorů v kovové slévárenské formě. Po tomto sestavení všech použitých dílů, nutných k měření teplotních polí odlitku, bylo možné začít proces spuštěním PC softwaru Personal DaqView plus 2.0.7 a nalitím taveniny do dutiny slévárenské formy.



Obr. 3.1 Sestava pro měření teplot ve slévárenské formě

3.1.1 Použitá slévarenská forma

K měření teplotních polí byla použita kovová forma, viz obr. 3.2 pro výrobu odlitků tvaru desky. Tato forma byla složena ze dvou dílů, které byly k sobě pevně spojeny pomocí zámků.



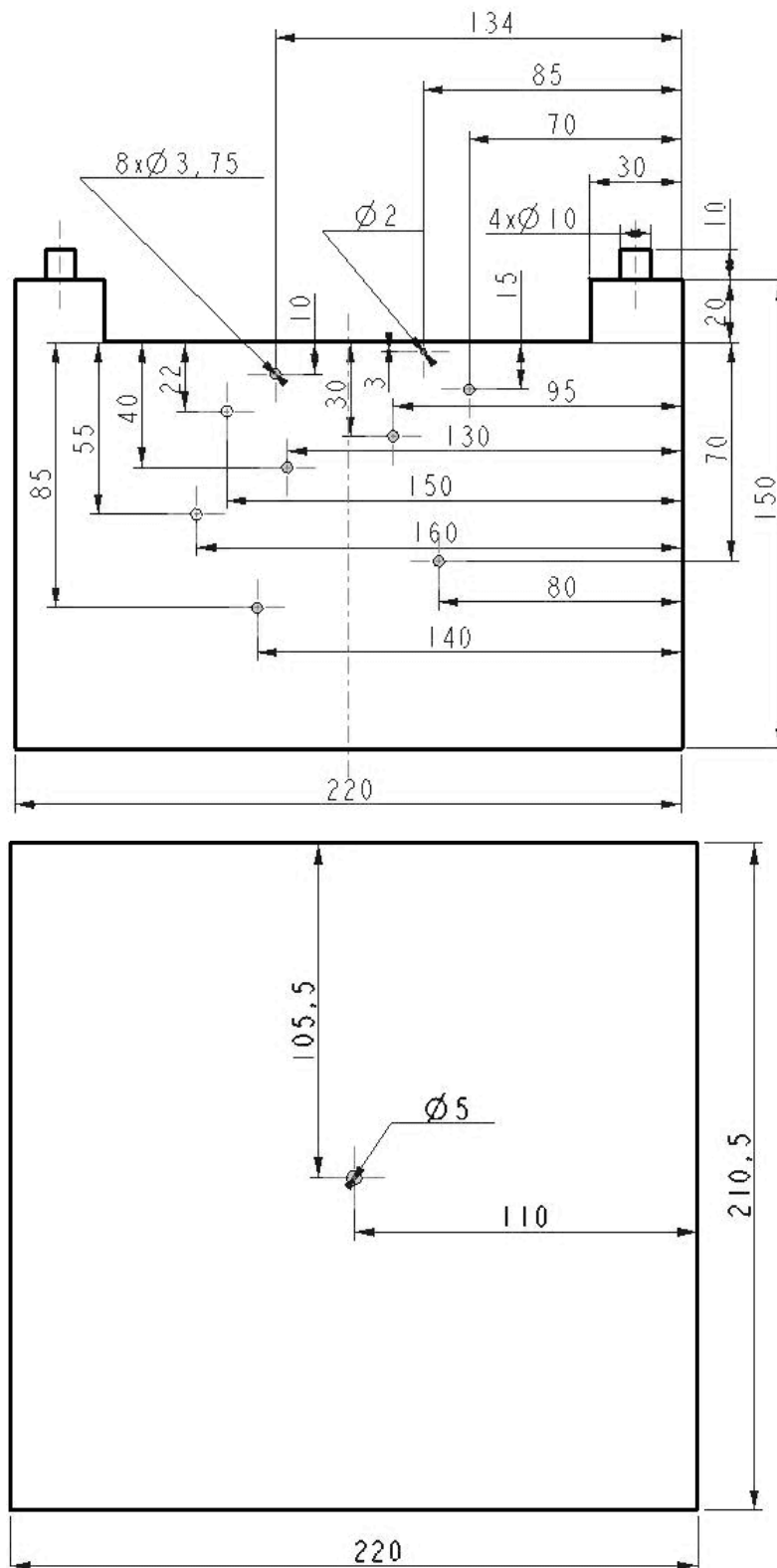
Obr. 3.2 Popis použité formy včetně znázornění otvorů pro umístění termočlánků

Slévarenská forma byla vyrobena z materiálu s označením X38CrMoV5_1 (ČSN 19552). Jedná se o nástrojovou chrom-molybdénovou ocel, což je speciální ocel určená pro práci za tepla. Chemické složení materiálu formy je uvedeno v tab. 3.1.

Tab. 3.1 Chemické složení oceli X38CrMoV5_1

Ocel X38CrMoV5_1 (ČSN 19552)									
Označení prvků		C	Mn	Si	Cr	Mo	V	W	Co
Obsah prvků [%]	min.	0,3	0,2	0,8	4,5	1,1	0,35	–	–
	max.	0,4	0,5	1,2	5,5	1,7	0,6	–	–

Základní rozměry této kovové formy jsou 210,5x220x280 mm; rozměry vnitřní dutiny jsou 210x160x20 mm. Ve stěně této formy jsou navrtány otvory pro umístění termočlánků. Poloha těchto otvorů je patrná z obr 3.3. Tepelně fyzikální veličiny materiálu použité formy jsou uvedeny v tab.3.2.



Obr. 3.3 Rozměry slévárenské formy a rozmístění otvorů pro termočláanky

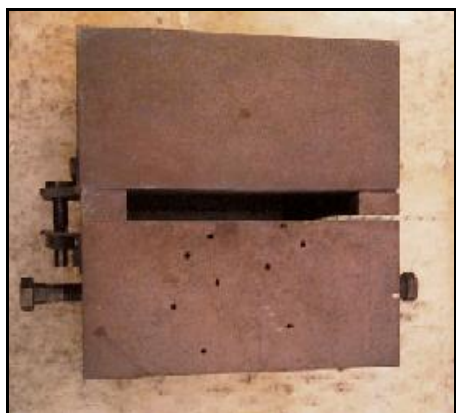
Tab. 3.2 Závislost tepelně fyzikálních veličin na teplotě pro ocel ČSN 19552

Teplota T [°C]	c [J.Kg ⁻¹ .K ⁻¹]	λ [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	ρ [kg.m ⁻³]
1	461	25	7740
100	496	26	7720
200	533	27	7700
300	568	27,4	7670
400	611	27,3	7630
500	677	26,8	7570
600	778	26,4	7540
700	1400	26,2	7520
800	740	26,3	7530

Pozn.: kde značí: c - měrná tepelná kapacita, λ - tepelná vodivost, ρ - hustota materiálu.

Během experimentu byla slévárenská forma umístěna na sibalové podložce, viz obr. 3.4 a). Rozměry odlitku tvaru desky jsou navrženy tak, aby bylo eliminováno tepelné ovlivnění středu odlitku bočními plochami. S ohledem na tuto podmínku byla tloušťka odlitku výrazně menší než jeho výška a šířka viz obr. 3.4 b). Vnější rozměry použité formy a rozměry její dutiny pro výrobu odlitku jsou koncipovány tak, že přestup tepla z odlitku do slévárenské formy během tuhnutí a chladnutí odlitku lze považovat za jednosměrné sdílení tepla (forma - odlitek tvaru polonekonečné desky, kapitola 2.1.4 viz obr. 2.8).

a)



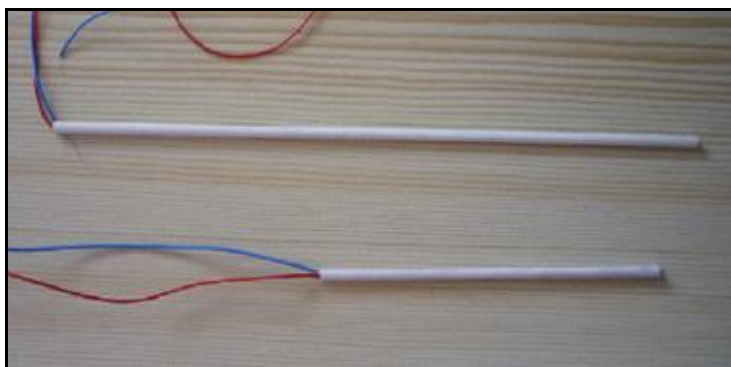
b)



Obr. 3.4 a) Kovová forma umístěná na sibalové podložce b) odlitek

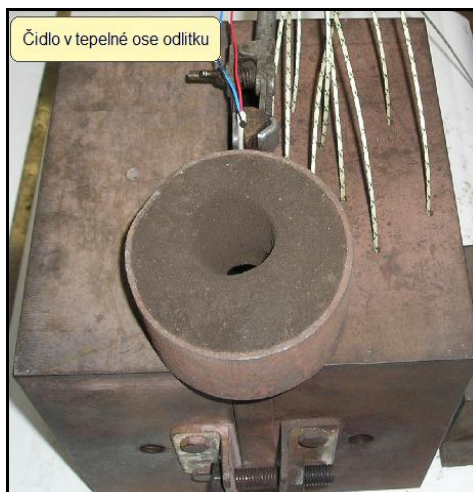
3.1.2 Použité termočlánky

K měření teplot v kovové slévárenské formě byly použity oplášťované termočlánky z materiálu NiCr-Ni o průměru vodiče 0,5 mm. Pro měření teploty na líci formy byly použity neizolované termočlánky o průměru 0,2 mm opět z materiálu NiCr-Ni. Část těchto neizolovaných termočlánků, která je uzpůsobena k měření teplot v tavenině, byla chráněna korundovou dvoukapilárou o rozměrech $\varnothing 5 \times 300$. Pro měření teplot v tepelné ose odlitku byly použity rovněž neizolované termočlánky o průměru 0,2 mm. Měřicí část těchto neizolovaných termočlánků byla opět chráněna korundovou dvoukapilárou, avšak o odlišných rozměrech - $\varnothing 4 \times 155$ mm, viz obr. 3.5.



Obr. 3.5 Termočlánky NiCr-Ni s korundovými dvoukapilárami

Před každým vlastním měřením byla očištěna dutina používané formy, otvory pro umístění termočlánků a čidla termočlánků. Odstranění nečistot bylo provedeno z důvodu zajištění kovového styku mezi termočlánky a formou, dále pak mezi odlévanou taveninou a lícem formy. Než se čidla termočlánků umístila do připravené formy, byla zkontrolována jejich bezchybnost měření pomocí monitoru měřícího zařízení a zapálené svíčky. Zároveň tím byla zkontrolována i připravenost celého zařízení k měření teplot. Následně se čidla všech termočlánků vložila do otvorů formy, jejichž hloubka zasahovala až do poloviny výšky slévárenské formy. V této výšce dutiny formy bylo také umístěno další čidlo termočlánku, které nám vyhodnocovalo teploty v tzv. tepelné ose odlitku, viz obr. 3.6. Čidlo pro měření teplot na líci formy bylo umístěno do místa, které odpovídá polovině výšky odlitku, polovině šířky odlitku a zároveň splývá s lícem této formy.



Obr. 3.6 Umístění čidla termočlánu v tepelné ose odlitku

3.1.3 Sběrnice dat OMEGA OMB-DAQ-55

Jedná se o univerzální modulový systém OMB-DAQ-55 pro sběr dat, který je možno připojit pomocí univerzální sériové linky USB téměř ke každému osobnímu počítači viz obr. 3.7. Systém se vyznačuje vysokou přesností, až 22-bitovým rozlišením. K systému je možno pro přímé měření připojit napěťové, frekvenční, pulzní, termočláňkové a digitální vstupy. Jednoduchým připojením k PC pomocí kabelu je zajištěn jak rychlý přenos dat, tak i napájení jednotlivých modulů. Systém OMB-DAQ-55 má 10 jednoduchých nebo termočláňkových vstupů, 8 digitálních kanálů a 2 frekvenční kanály [10].



Obr. 3.7 Sběrnice dat OMEGA OMB-DAQ-55 [10]

3.1.4 Slitiny použité pro odlévání

V rámci experimentu byly pro odlévání použity tyto neželezné kovy: čistý hliník, čistý zinek, slitiny AlSi12 a AlSi30. V tab. 3.3 jsou uvedeny teploty tání a teploty lití těchto kovů nutných k experimentu. Jednotlivé druhy materiálů byly vkládány do grafitového kelímku a poté nataveny v odporové peci s typovým označením RNO 4,5.6.3/10 ČSN 33 5001, viz obr. 3.8. Parametry pece jsou: příkon 18 kW, jmenovitá teplota 960°C, hmotnost 710 kg a jmenovité napětí 380V/50Hz. Následně se natavený materiál (tavenina) odléval za stanovených podmínek tj. do studené nebo přehřáté kovové slévárenské formy.



Obr.3.8 Odporová pec pro tavení materiálu

Tab. 3.3 Použité materiály v experimentální části, jejich teplota tání a teplota lití

	Odlévaný materiál	Teplota tání [°C]	Teplota lití [°C]
studená forma	Čistý Al	660	690
	Čistý Zn	420	460
	AlSi12	560	620
	AlSi30	800	819
přehřátá forma	Čistý Al	660	690
	Čistý Zn	420	470
	AlSi12	560	630
	AlSi30	800	825

3.2 Provedené experimenty

V experimentální části stanovení teplotních polí ve slévárenské formě, resp. při sledování časových závislostí teplot v tepelné ose odlitku tvaru desky 210x160x20 a ve slévárenské formě (na líci, ve vzdálenosti 3, 10, 15, 22, 30, 40, 55, 70, 85 mm od líce), bylo provedeno celkem osm měření (čtyři do slévárenské formy o teplotě cca 20°C a čtyři do přehřáté slévárenské formy v rozmezí teplot 220-420°C), pro která byly použity tyto materiály: čistý hliník, čistý zinek, slitina AlSi12 a slitina AlSi30. Jednotlivé druhy materiálu byly vloženy do tavicího kelímku a nataveny v odporové peci. Před každým odlitím do slévárenské formy byla kontrolována teplota taveniny pomocí digitálního teploměru s termočlánkem GTH 1150 firmy GREISINGER made in Germany. Rozsah tohoto měřidla je od -50°C až do +1150°C. Následně se tavenina odlévala do studené nebo přehřáté slévárenské formy umístěné na podložce z tepelně izolační hmoty Sibrál. V okamžiku vlastního odlévání se začal zaznamenávat časový průběh naměřených teplot v celém rozsahu odlévání, tuhnutí i chladnutí odlitku v jednotlivých místech slévárenské formy, ale také i v tepelné ose odlitku a na líci formy. Časový průběh teplotních polí v jednotlivých místech slévárenské formy byl zaznamenáván pomocí termočlánků, sběrnic dat a registrován PC s příslušným záznamovým médiem. Celý průběh měření bylo možno sledovat na obrazovce monitoru PC. Tyto naměřené teploty, resp. jejich časové závislosti nám charakterizují teplotní pole ve stěně této formy. Přehled podmínek jednotlivých měření ve formě je uveden v tab. 3.4 (Al, Zn) a v tab. 3.5 (AlSi12, AlSi30). Jednotlivá měření byla zaznamenávána a následně vyhodnocena v diagramech.

Tab. 3.4 Přehled podmínek měření ve formě

Č. měření	Odléváný materiál	Teplota formy T [°C]	Teplota lití [°C]
1.	Čistý Al	20	690
2.	Čistý Al	175	690
3.	Čistý Zn	20	460
4.	Čistý Zn	320	470

Tab. 3.5 Přehled podmínek měření ve formě

Č. měření	Odléváný materiál	Teplota formy T [°C]	Teplota lití [°C]
5.	AlSi12	20	620
6.	AlSi12	340	630
7.	AlSi30	20	819
8.	AlSi30	420	825

Získané časové závislosti teplot z jednotlivých typů experimentů jsou uvedeny níže, spolu s výsledky provedených simulačních výpočtů, tj. s nasimulovanými časovými závislostmi na teplotě při respektování stejných experimentálních podmínek, viz obr. 3.10 až 3.21. V tab. 3.6 až tab. 3.7 jsou uvedeny vstupní veličiny nutné k simulacím teplotních polí ve slévárenské formě.

3.3 Simulační výpočet teplotního pole formy

Provedené simulační výpočty časových závislostí teplot byly uskutečny v počítačové laboratoři KSP TUL pomocí programu QuikCAST, který byl vytvořen ve firmě ESI GROUP, Pechaney Paris, Francie. Jedná se o simulační program určený k rychlým výpočtům a k optimalizaci fáze plnění a tuhnutí odlitku včetně předurčení slévárenských vad. Tento program pracuje na základě metody konečných diferencí viz kapitola 2.3.1. Simulační výpočet se skládá ze tří kroků:

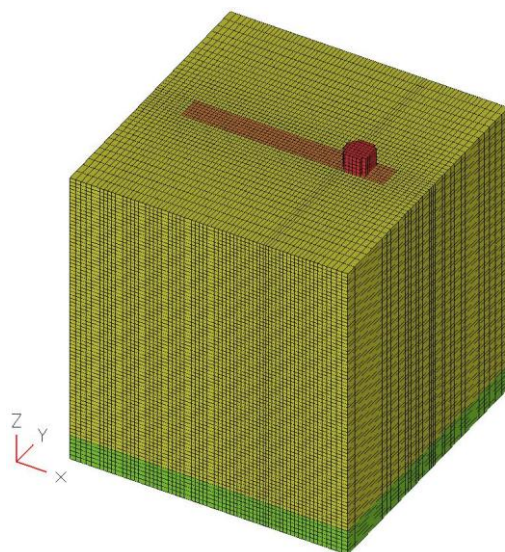
Preprocessing - vytváření geometrických tvarů odlitku,

Mainprocessing - hlavní krok simulačního výpočtu, program provede výpočet teploty v jednotlivých časových okamžicích a v daných místech odlitku a formy,

Postprocessing - je forma zobrazování výsledků, výsledky se zobrazují barevně dle potřeby ve 3D, pokud se jedná o prostorové rozložení sledovaných veličin, lze provést zobrazení i jiným způsobem, např. pomocí křivek). Na obr. 3.9 je znázorněna geometrie tvaru formy s dutinou pro odlitek tvaru desky. Současně objem formy je rozdělen na elementy, které umožňují numerický simulační výpočet s využitím metody konečných diferencí.

Hodnoty potřebných tepelně-fyzikálních veličin pro simulační výpočet byly převzaty z databáze programu QuikCAST nebo byly do výpočtu externě dodány. Pro výpočet se používají hodnoty těchto veličin: teplota likvidu odlévaného kovu, teplota solidu

odlévaného kovu, eutektická teplota odlévaného kovu, latentní krystalizační teplo, dynamická viskozita, hodnota objemového smršťování, hustota odlévaného kovu, měrná tepelná kapacita odlévaného kovu, tepelná vodivost odlévaného kovu. Dále to jsou veličiny, které charakterizují slévarenskou formu: hustota materiálu formy, tepelná vodivost a měrná tepelná kapacita materiálu formy. Důležitá je také hodnota tepelného odporu mezi materiálem odlitku a formou. Pro zpřesnění simulačního výpočtu je nutno zadávat tepelně-fyzikální veličiny v závislosti na teplotě.



Obr. 3.9 Geometrie tvaru formy s dutinou pro odlitek tvaru desky



Tab. 3.6 Hodnoty pro simulační výpočet - měření č. 1

Ocelová forma	19552
Materiál odlévaného kovu	Čistý Al
Teplota likvidu [°C]	660,05
Teplota solidu [°C]	658,05
Latentní teplo [J.kg ⁻¹]	396100
Teplota formy [°C]	20
Ochranný nástřik [mm]	Bez
Teplota okolního vzduchu [°C]	20
Izolační materiál dna formy	Sibral

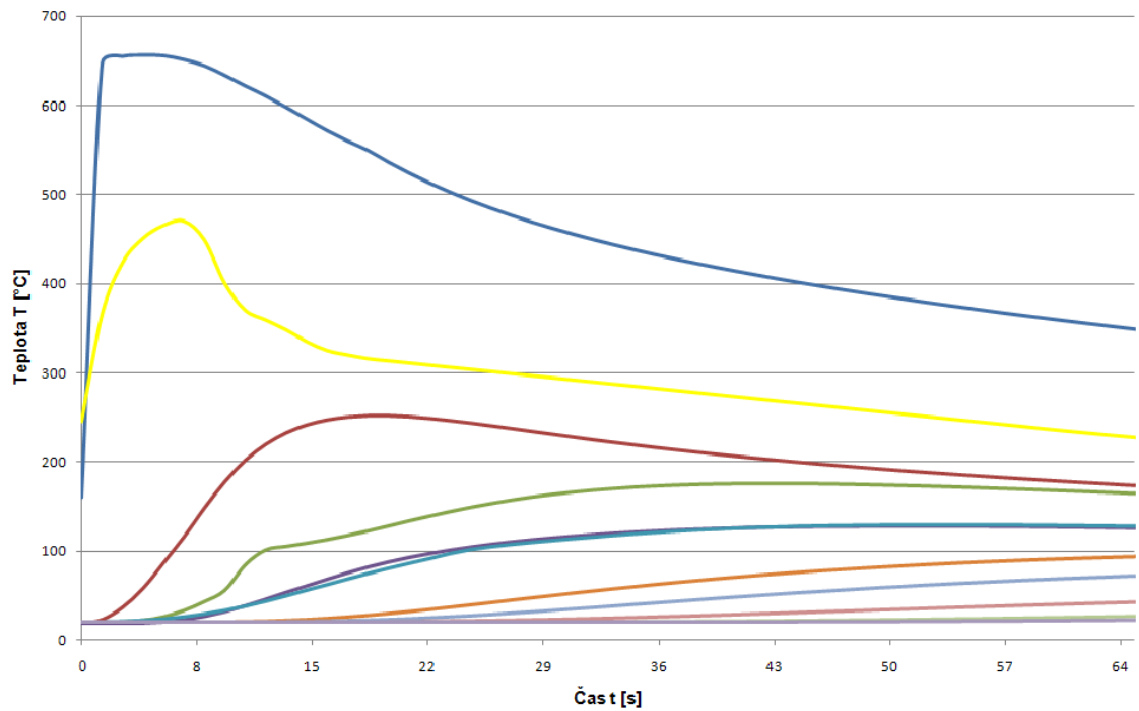
Pozn.: Další používané tepelně-fyzikální veličiny, které byly potřebné k simulování teplotních polí byly použity z databanky simulačního programu QuikCAST.

Tab. 3.7 Součinitel prostupu tepla β závislý na teplotě

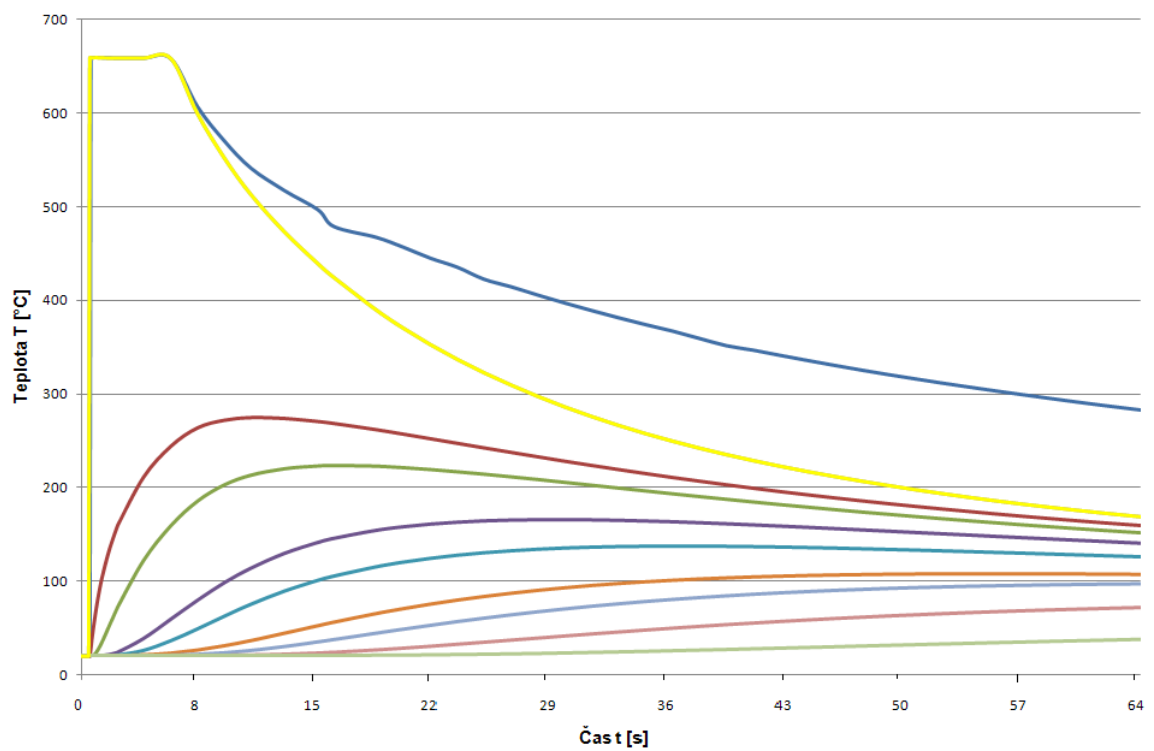
Teplota T [°C]	souč. β [W.m ⁻² .K ⁻¹]	1/ β [W.m ⁻² .K ⁻¹] ⁻¹
80	70	0,0143
100	90	0,011
200	150	0,007
300	250	0,004
400	440	0,0023
500	870	0,0015
600	1900	0,00053
700	4000	0,00025
800	4000	0,00025

Legenda k obr. 3.10 a obr. 3.11: kde x-značí vzdálenost termočlánek od líce formy

1. termočlánek v tepel ose	5. x=15(mm)	9. x=55(mm)
2. termočlánek na líci	6. x=22(mm)	10. x=70(mm)
3. x=3 (mm)	7. x=30(mm)	11. x=85(mm)
4. x=10(mm)	8. x=40(mm)	



Obr. 3.10 Naměřená časová závislost na teplotě, čistý Al, forma bez předeřevu



Obr. 3.11 Nasimulovaná časová závislost na teplotě, čistý Al, forma bez předeřevu



Tab. 3.8 Hodnoty pro simulační výpočet - měření č. 2

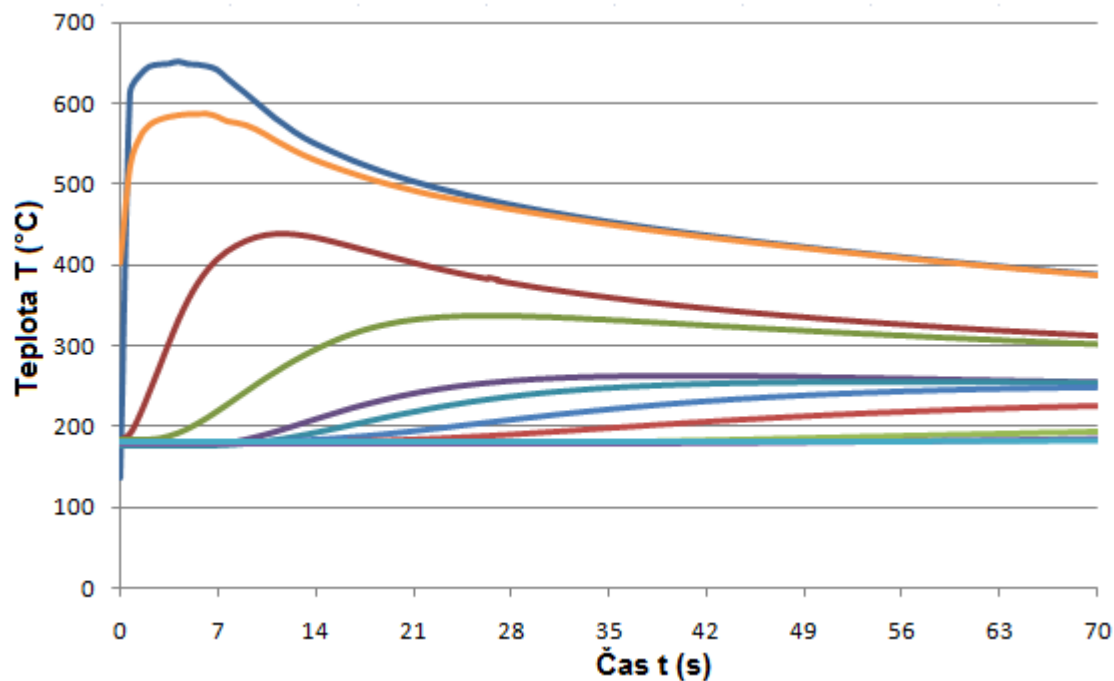
Ocelová forma	19552
Materiál odlévaného kovu	Čistý Al
Teplota likvidu [°C]	660,05
Teplota solidu [°C]	658,05
Latentní teplo [J.kg ⁻¹]	396100
Teplota formy [°C]	175
Ochranný nástřík [mm]	Bez
Teplota dutiny formy [°C]	165
Izolační materiál dna formy	Sibral

Tab. 3.9 Součinitel prostupu tepla β závislý na teplotě

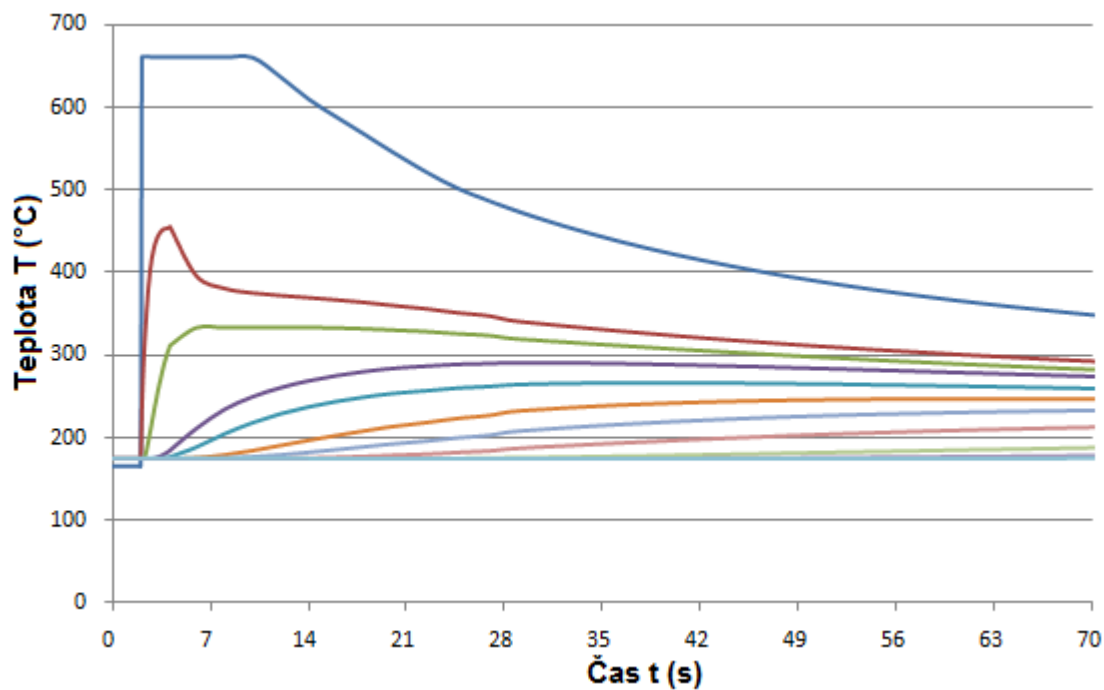
Teplota T [°C]	souč. β [W.m ⁻² .K ⁻¹]	1/ β [W.m ⁻² .K ⁻¹] ⁻¹
80	20	0,05
100	40	0,025
200	80	0,0125
300	110	0,009091
400	170	0,005882
500	270	0,0037
600	2000	0,0005
700	4500	0,000222
800	4500	0,000222

Legenda k obr. 3.12 a obr. 3.13: kde x značí vzdálenost termočláneku od líce formy

1. termočlánek v tepel ose	5. x=15(mm)	9. x=55(mm)
2. termočlánek na líci	6. x=22(mm)	10. x=70(mm)
3. x=3 (mm)	7. x=30(mm)	11. x=85(mm)
4. x=10(mm)	8. x=40(mm)	



Obr. 3.12 Naměřená časová závislost na teplotě, čistý Al, forma s předehřevem 175°C



Obr. 3.13 Nasimulovaná časová závislost na teplotě, čistý Al, s předehřevem 175°C



Tab. 3.10 Hodnoty pro simulační výpočet - měření č. 3

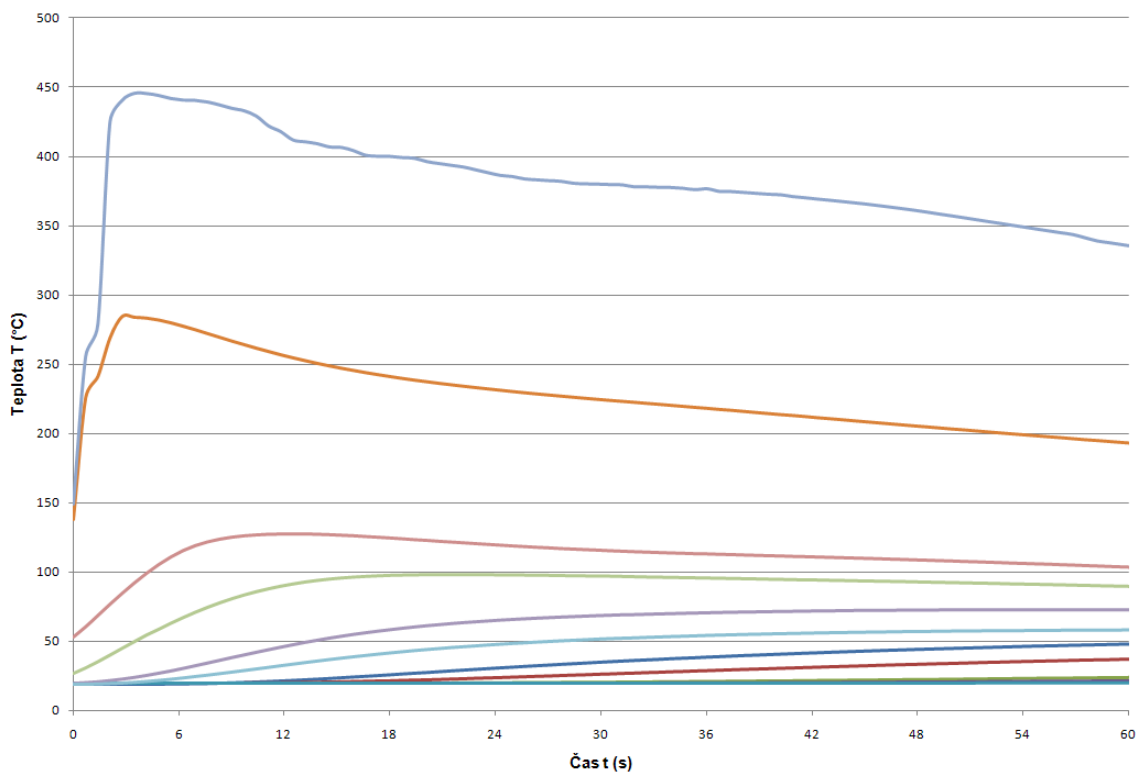
Ocelová forma	19552
Materiál odlévaného kovu	Čistý Zn
Teplota likvidu [°C]	419,45
Teplota solidu [°C]	417,45
Latentní teplo [J.kg ⁻¹]	113000
Teplota formy [°C]	20
Ochranný nástřík [mm]	Bez
Teplota okolního vzduchu [°C]	20
Izolační materiál dna formy	Sibral

Tab. 3.11 Součinitel prostupu tepla β závislý na teplotě

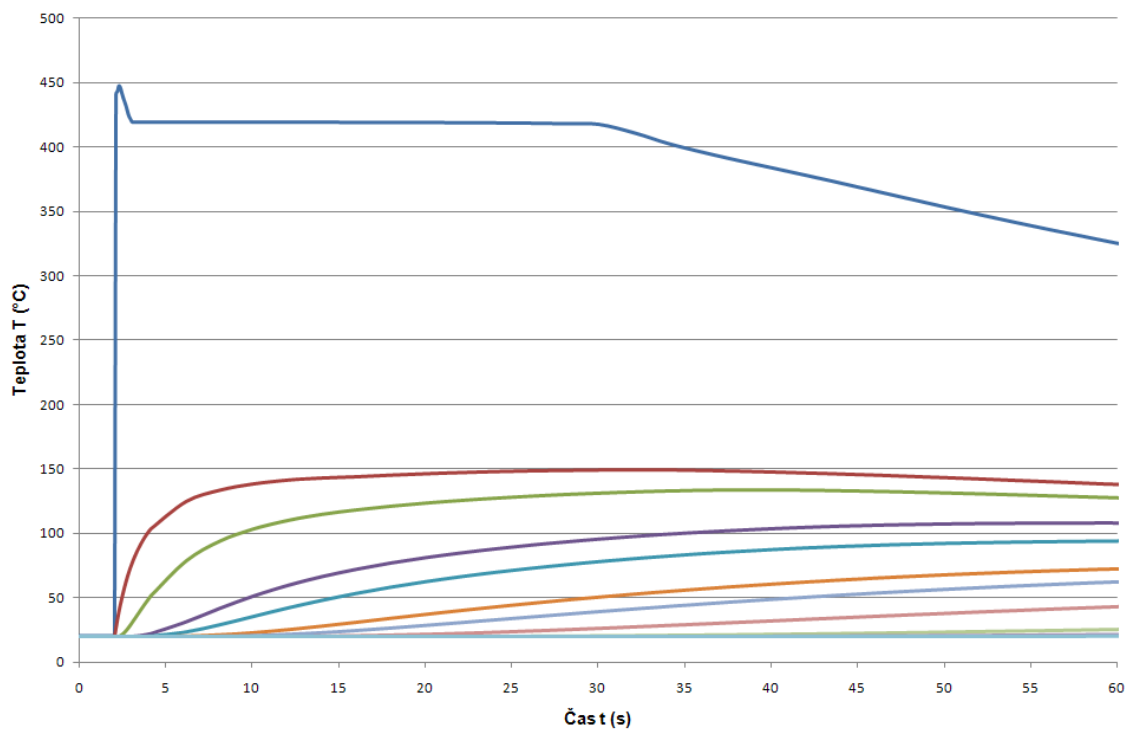
Teplota T [°C]	souč. β [W.m ⁻² .K ⁻¹]	1/ β [W.m ⁻² .K ⁻¹] ⁻¹
85	70	0,01429
100	90	0,01111
200	180	0,00555
300	270	0,0037
400	900	0,00111
490	3850	0,00026
500	3850	0,00026
600	3850	0,00026
700	3850	0,00026
800	3850	0,00026

Legenda k obr. 3.14 a obr. 3.15: kde x-značí vzdálenost termočlánek od líce formy

1. termočlánek v tepel ose	5. x=15(mm)	9. x=55(mm)
2. termočlánek na líci	6. x=22(mm)	10. x=70(mm)
3. x=3 (mm)	7. x=30(mm)	11. x=85(mm)
4. x=10(mm)	8. x=40(mm)	



Obr. 3.14 Naměřená časová závislost na teplotě, čistý Zn, forma bez přehřevu



Obr. 3.15 Nasimulovaná časová závislost na teplotě, čistý Zn, forma bez přehřevu



Tab. 3.12 Hodnoty pro simulační výpočet - měření č. 4

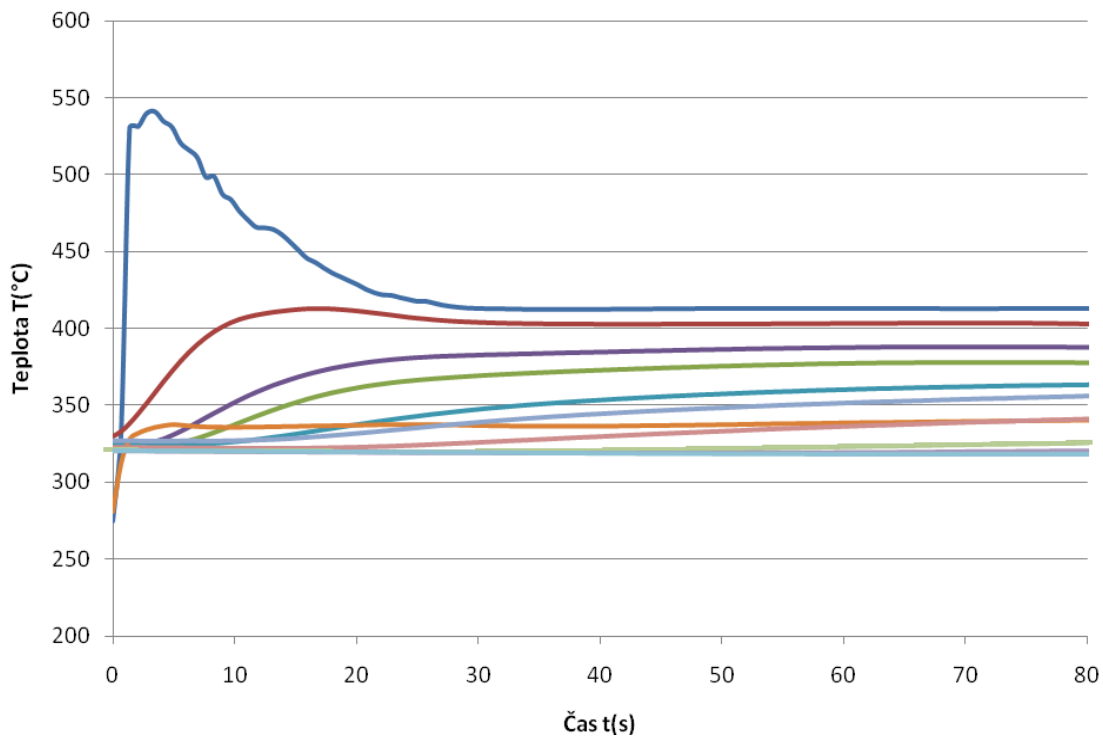
Ocelová forma	19552
Materiál odlévaného kovu	Čistý Zn
Teplota likvidu [°C]	419,45
Teplota solidu [°C]	417,45
Latentní teplo [J.kg ⁻¹]	113000
Teplota formy [°C]	320
Ochranný nástřík [mm]	Bez
Teplota dutiny formy [°C]	280
Izolační materiál dna formy	Sibral

Tab. 3.13 Součinitel prostupu tepla β závislý na teplotě

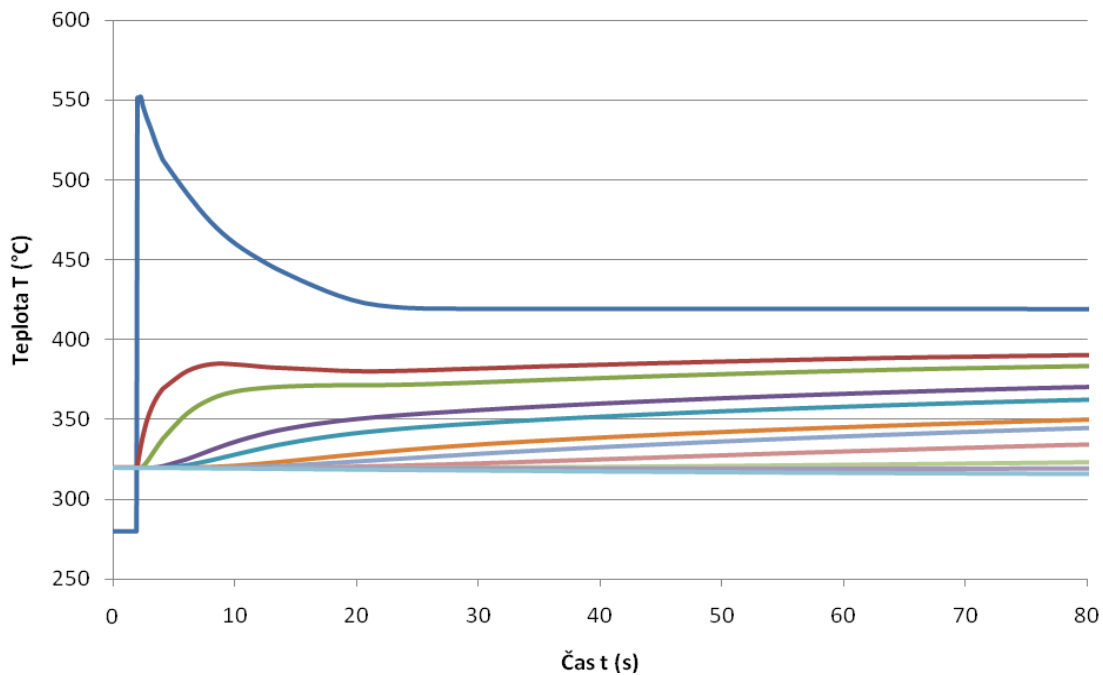
Teplota T [°C]	souč. β [W.m ⁻² .K ⁻¹]	1/ β [W.m ⁻² .K ⁻¹] ⁻¹
80	70	0,01429
100	90	0,01111
200	180	0,00555
300	270	0,0037
400	2500	0,0004
500	2500	0,0004
544	3800	0,00026
600	3800	0,00026

Legenda k obr. 3.16 a obr. 3.17: kde x-značí vzdálenost termočlánu od líce formy

1. termočlánek v tepel ose	5. x=15(mm)	9. x=55(mm)
2. termočlánek na líci	6. x=22(mm)	10. x=70(mm)
3. x=3 (mm)	7. x=30(mm)	11. x=85(mm)
4. x=10(mm)	8. x=40(mm)	



Obr. 3.16 Naměřená časová závislost na teplotě, čistý Zn, s přehřevem 320°C



Obr. 3.17 Nasimulovaná časová závislost na teplotě, čistý Zn, s přehřevem 320°C



Tab. 3.14 Hodnoty pro simulační výpočet - měření č. 5

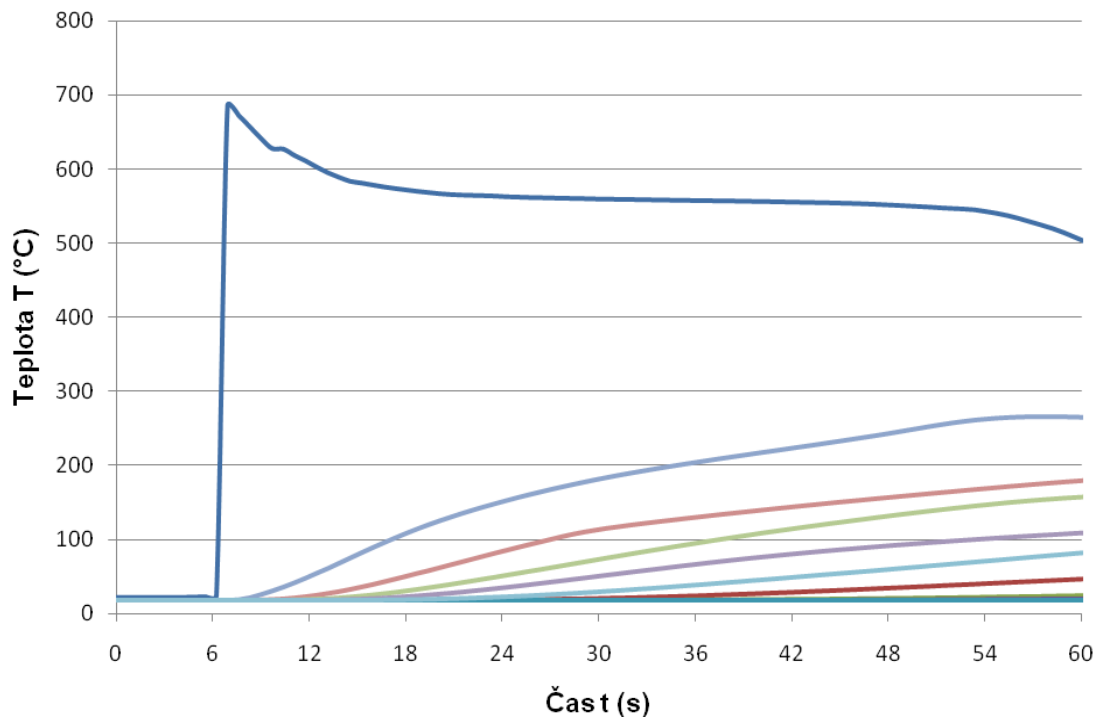
Ocelová forma	19552
Materiál odlévaného kovu	AlSi12
Teplota likvidu [°C]	565
Teplota solidu [°C]	507
Latentní teplo [J.kg ⁻¹]	500000
Teplota formy [°C]	20
Ochranný nástřík [mm]	Bez
Teplota okolního vzduchu [°C]	20
Izolační materiál dna formy	Sibral

Tab. 3.15 Součinitel prostupu tepla β závislý na teplotě

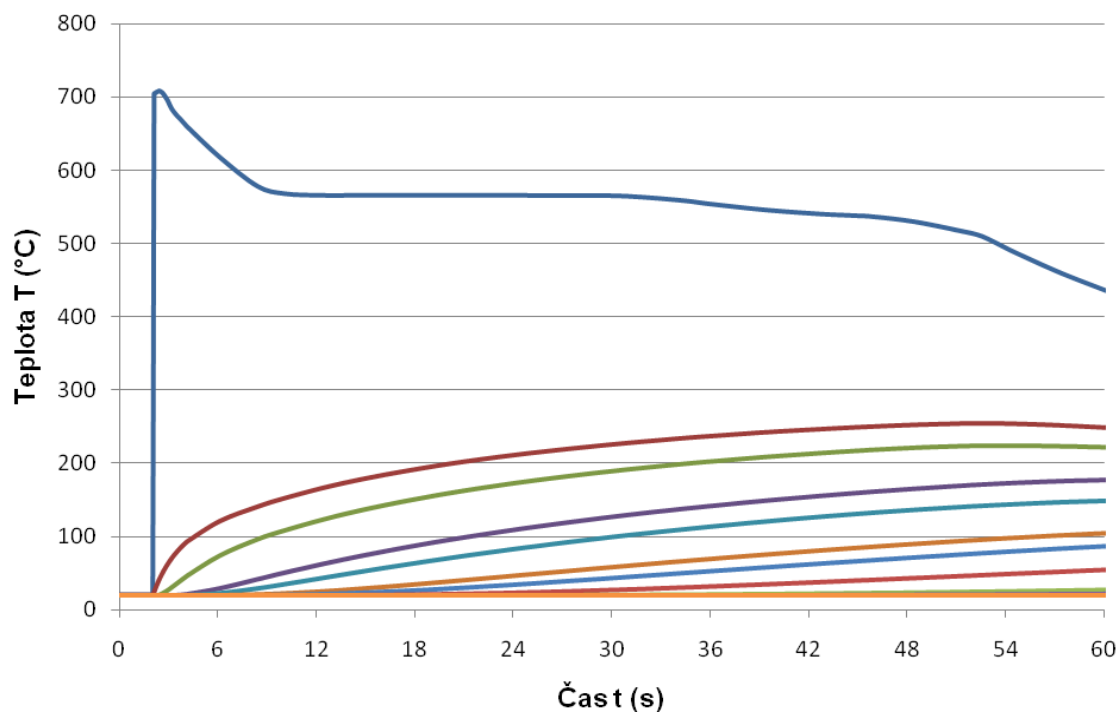
Teplota T [°C]	souč. β [W.m ⁻² .K ⁻¹]	1/ β [W.m ⁻² .K ⁻¹] ⁻¹
85	800	0,00125
100	850	0,0011765
200	900	0,001111
300	900	0,001111
400	1000	0,001
500	1000	0,001
600	1100	0,000909
700	1100	0,000909
800	1100	0,000909

Legenda k obr. 3.18 a obr. 3.19: kde x-značí vzdálenost termočláneku od líce formy

1. termočlánek v tepel ose	6. x=22(mm)	10. x=70(mm)
3. x=3 (mm)	7. x=30(mm)	11. x=85(mm)
4. x=10(mm)	8. x=40(mm)	
5. x=15(mm)	9. x=55(mm)	



Obr. 3.18 Naměřená časová závislost na teplotě, slitina AlSi12, forma bez přehřevu



Obr. 3.19 Nasimulovaná časová závislost na teplotě, slitina AlSi12, bez přehřevu



Tab. 3.16 Hodnoty pro simulační výpočet - měření č. 6

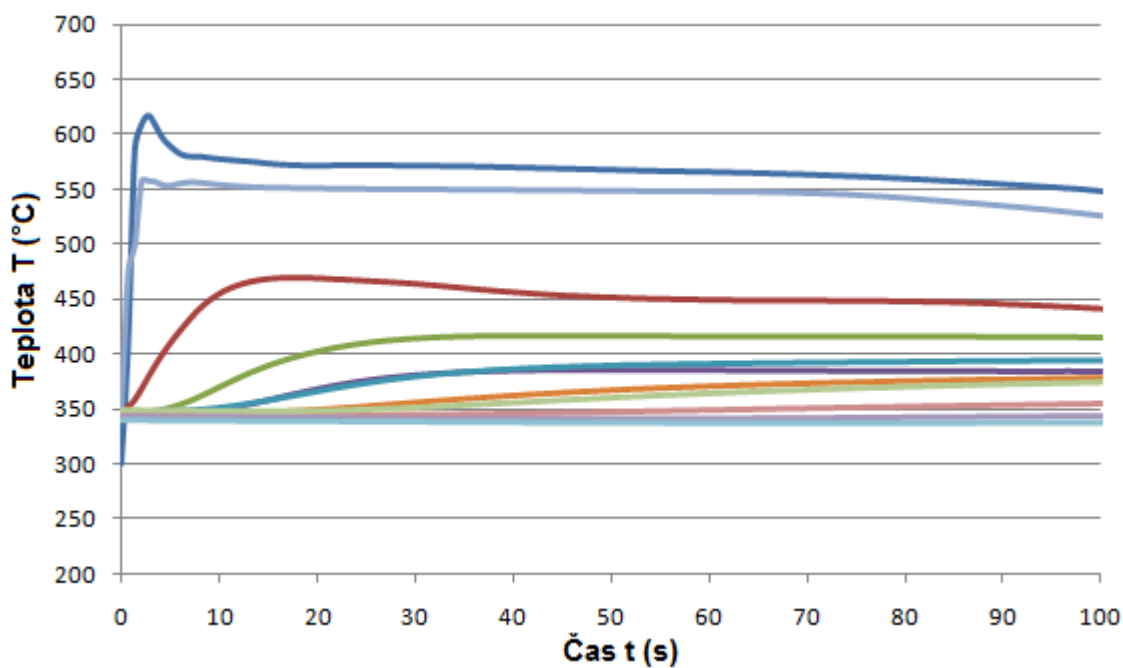
Ocelová forma	19552
Materiál odlévaného kovu	AlSi12
Teplota likvidu [°C]	565
Teplota solidu [°C]	507
Latentní teplo [J.kg ⁻¹]	500000
Teplota formy [°C]	340
Ochranný nástřík [mm]	Bez
Teplota dutiny formy [°C]	300
Izolační materiál dna formy	Sibral

Tab. 3.17 Součinitel prostupu tepla β závislý na teplotě

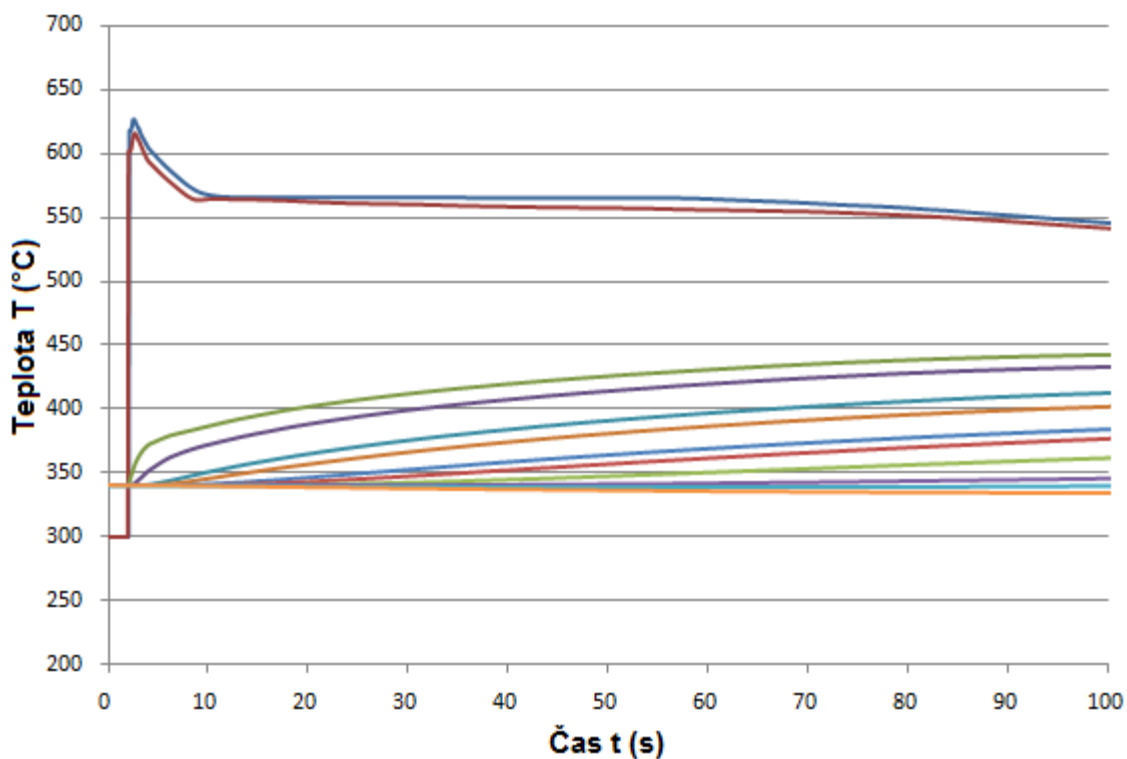
Teplota T [°C]	souč. β [W.m ⁻² .K ⁻¹]	1/ β [W.m ⁻² .K ⁻¹] ⁻¹
80	240	0,00417
100	280	0,00357
200	310	0,00323
300	370	0,0027
400	800	0,00125
500	900	0,00111
600	900	0,00111
700	4000	0,00025
800	4000	0,00025

Legenda k obr. 3.20 a obr. 3.21: kde x-značí vzdálenost termočláneku od líce formy

1. termočlánek v tepelný ose	5. x=15(mm)	9. x=55(mm)
2. termočlánek na líci	6. x=22(mm)	10. x=70(mm)
3. x=3 (mm)	7. x=30(mm)	11. x=85(mm)
4. x=10(mm)	8. x=40(mm)	



Obr. 3.20 Naměřená časová závislost na teplotě, AlSi12, forma s předehřevem 340°C



Obr. 3.21 Nasimulovaná časová závislost na teplotě, AlSi12, s předehřevem 340°C

3.4 Výpočet teplotního pole formy

V třetí části tohoto experimentu je uveden výpočet teplot v jednotlivých místech slévárenské formy v okamžiku ztuhnutí odlitku. Jedná se o kontrolní výpočet, k němuž byla použita metoda Gaussova integrálu chyb (3.1). K výpočtu pomocí této metody je nutné znát součinitele tepelné vodivosti formy a_F , který lze vypočítat podle rovnice (3.2).

Účelem tohoto výpočtu bylo porovnání odchylek mezi naměřenými a vypočtenými teplotami. Pro výpočet bylo nutné z naměřených hodnot stanovit teplotu rozhraní T_{PR} . Další nezbytné veličiny všech námi použitých materiálů (závislé na teplotě c_F , λ_F , ρ_F) potřebné k tomuto výpočtu byly určeny ze závislostí viz příloha č. 1 až příloha č. 4. Argument Gaussova integrálu chyb byl odečítán z diagramu viz obr. 2.9. Jednotlivé vypočtené a naměřené hodnoty jsou uvedeny v tab. 3.18 až tab. 3.25. Jejich porovnání je znázorněno na obr. 3.22 až obr. 3.30.

$$T_{F(x,t)} = T_{PR} - (T_{PR} - T_F) \cdot \operatorname{erf} \left[\frac{x}{2 \cdot \sqrt{a_F \cdot t}} \right] \quad (3.1)$$

$$a_F = \frac{\lambda_F}{c_F \cdot \rho_F} \quad (3.2)$$

kde značí: T_{PR} - teplota rozhraní odlitek - forma [K];

T_F - počáteční teplota formy [K];

a_F - teplotní vodivost formy [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$];

x - vzdálenost v tělese od nahřívajícího povrchu [m];

t - čas [s];

erf - argument Gaussova integrálu chyb;

c_F - měrná tepelná kapacita formy [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$];

λ_F - tepelná vodivost formy [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$];

ρ_F - hustota materiálu formy [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$].

Příklad výpočtu:

Příklad výpočtu teplotního pole formy byl proveden pro odlévání čistý hliník, jehož teplota taveniny byla 690°C . Teplota slévárenské formy 20°C . Z přílohy č. 1 až č. 4 byly určeny veličiny $\lambda = 25 [\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$, $c = 461 [\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$, $\rho = 7740 [\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$ a dopočtena teplotní vodivost $a = 7,0 \cdot 10^{-6} [\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$ (3.2), čas $t = 6,930 [\text{s}]$ byl odečten z naměřených hodnot. Teplota rozhraní $T_{PR} = 344,9 [^\circ\text{C}]$ byla odečtena z naměřených hodnot. Vzdálenosti od líce $x = 3; 10; 15; 22; 30; 40; 55; 70; 85 [\text{mm}]$.



$$T_{(x,t)} = T_{PR} - (T_{PR} - T_F) \cdot \operatorname{erf} \cdot \frac{x}{2 \cdot \sqrt{a_F \cdot t}}$$

$$T_{(0,003)} = 344,97 - (344,97 - 21) \cdot \operatorname{erf} \cdot \frac{0,003}{2 \cdot \sqrt{7,0 \cdot 10^{-6} \cdot 6,930}} = \underline{275,3^{\circ}\text{C}}$$

$$T_{(0,010)} = 344,97 - (344,97 - 21) \cdot \operatorname{erf} \cdot \frac{0,010}{2 \cdot \sqrt{7,0 \cdot 10^{-6} \cdot 6,930}} = \underline{126,3^{\circ}\text{C}}$$

$$T_{(0,015)} = 344,97 - (344,97 - 21) \cdot \operatorname{erf} \cdot \frac{0,015}{2 \cdot \sqrt{7,0 \cdot 10^{-6} \cdot 6,930}} = \underline{82,5^{\circ}\text{C}}$$

$$T_{(0,022)} = 344,97 - (344,97 - 21) \cdot \operatorname{erf} \cdot \frac{0,022}{2 \cdot \sqrt{7,0 \cdot 10^{-6} \cdot 6,930}} = \underline{42,4^{\circ}\text{C}}$$

$$T_{(0,030)} = 344,97 - (344,97 - 21) \cdot \operatorname{erf} \cdot \frac{0,030}{2 \cdot \sqrt{7,0 \cdot 10^{-6} \cdot 6,930}} = \underline{25,9^{\circ}\text{C}}$$

$$T_{(0,040)} = 344,97 - (344,97 - 21) \cdot \operatorname{erf} \cdot \frac{0,040}{2 \cdot \sqrt{7,0 \cdot 10^{-6} \cdot 6,930}} = \underline{21^{\circ}\text{C}}$$

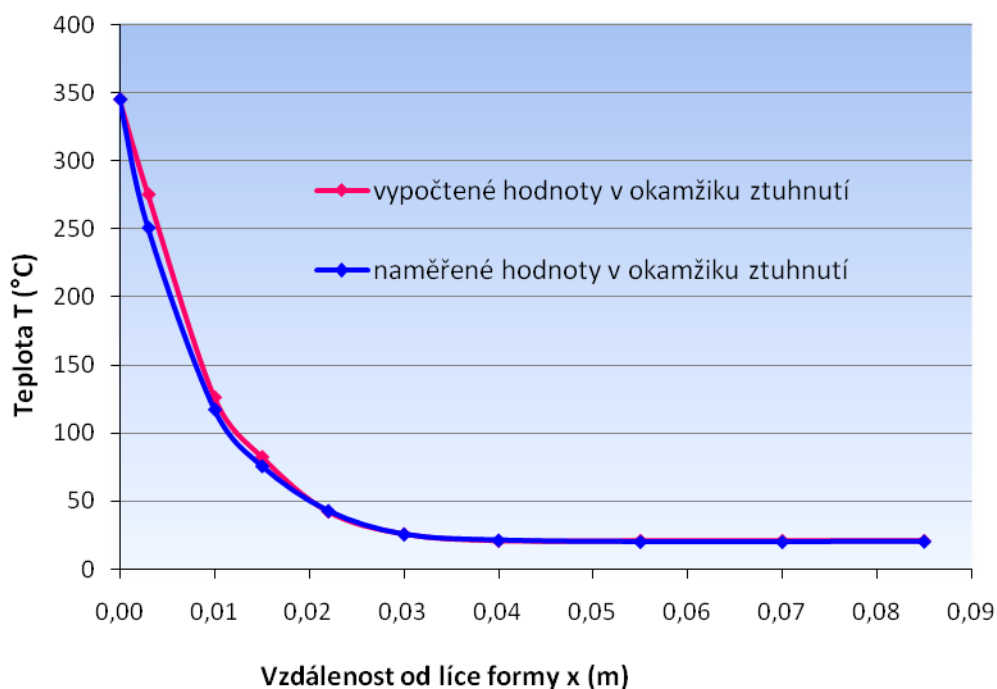
$$T_{(0,055)} = \underline{21^{\circ}\text{C}}$$

$$T_{(0,070)} = \underline{21^{\circ}\text{C}}$$

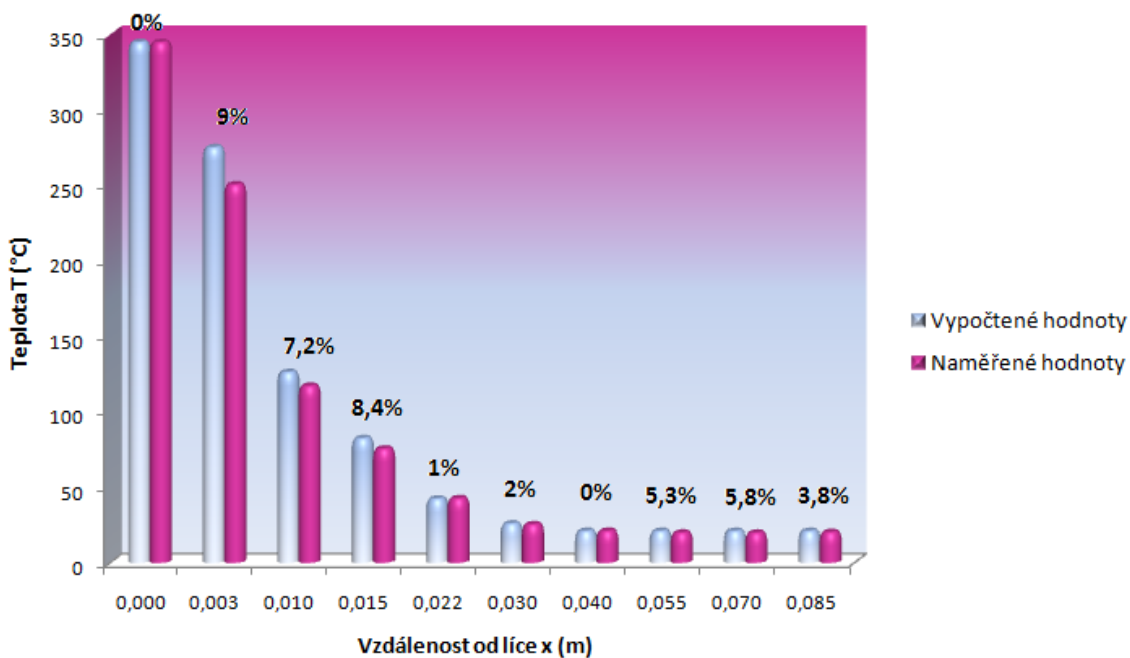
$$T_{(0,085)} = \underline{21^{\circ}\text{C}}$$

Tab. 3.18 Vypočtené a naměřené hodnoty (Al - studená forma 20°C)

Vzdálenost od líce x [m]	Vypočtené teploty [°C]	Naměřené teploty [°C]
0	344,9	344,9
0,003	275,3	250,6
0,010	126,3	117,2
0,015	82,5	75,6
0,022	42,4	42,7
0,030	25,9	25,4
0,040	21	21
0,055	21	19,9
0,070	21	19,8
0,085	21	20,2



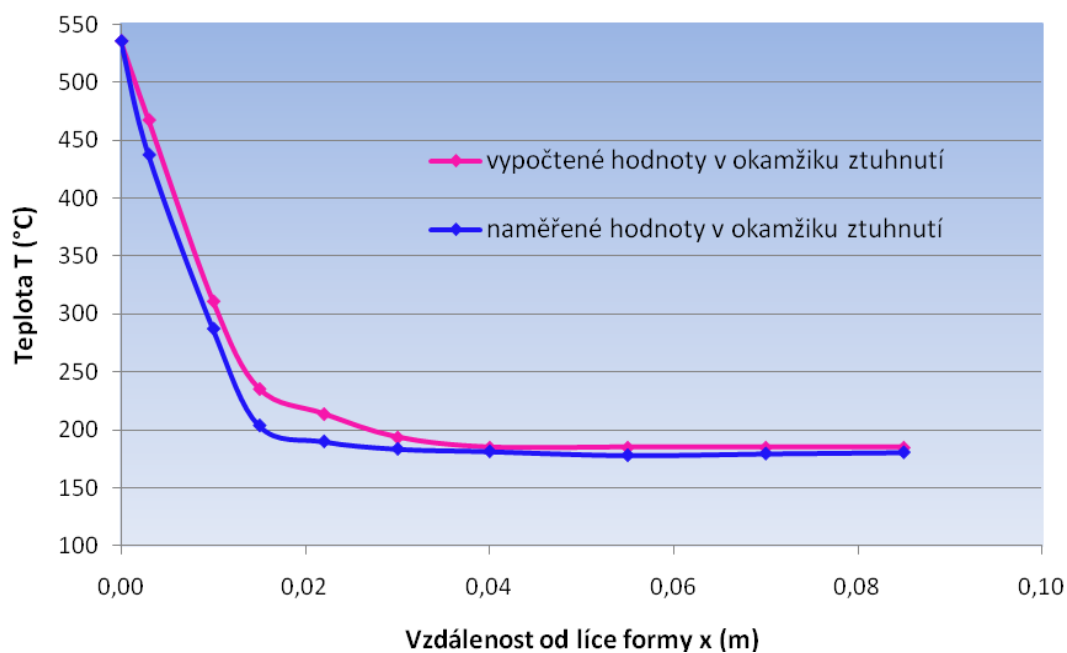
Obr. 3.22 Závislost teploty na vzdálenosti od líce formy v okamžiku ztuhnutí odlitku



Obr. 3.23 Znáznornění odlišnosti mezi naměřenými a vypočtenými teplotami v [%]

Tab. 3.19 Vypočtené a naměřené hodnoty (Al - předeřátá forma 175°C)

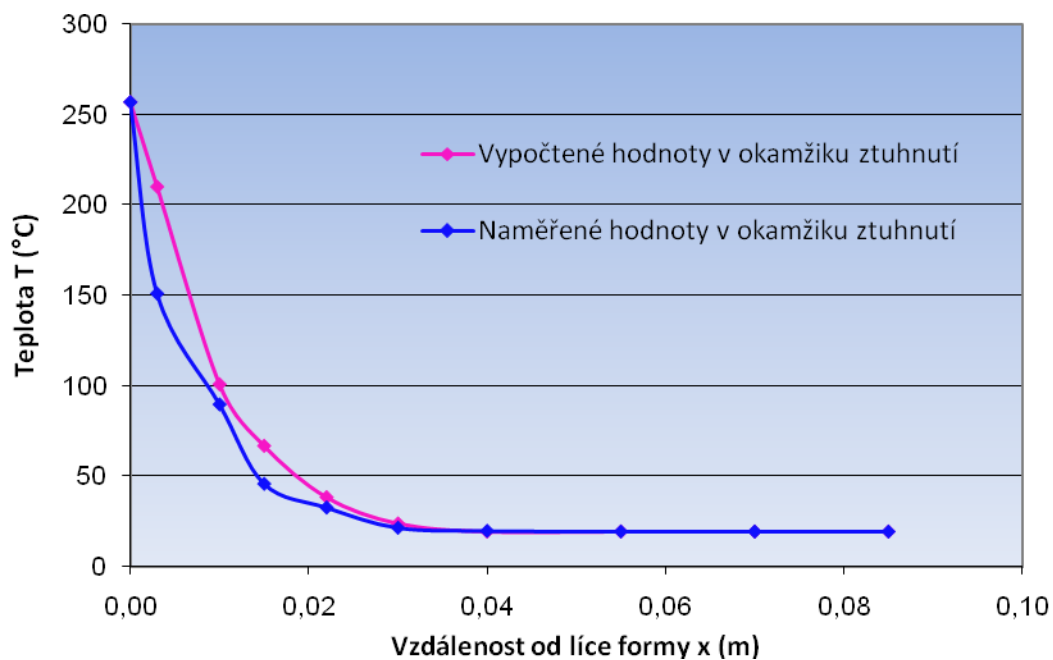
Vzdálenost od líce x [m]	Vypočtené teploty [°C]	Naměřené teploty [°C]
0	535,4	535,4
0,003	467,4	437,3
0,010	311,1	287,2
0,015	235,6	203,8
0,022	213,9	190
0,030	193,7	183,6
0,040	185	181,4
0,055	185	178,1
0,070	185	179,5
0,085	185	180,6



Obr. 3.24 Závislost teploty na vzdálenosti od líce formy v okamžiku ztuhnutí odlitku

Tab. 3.20 Vypočtené a naměřené hodnoty (Zn - studená forma 20°C)

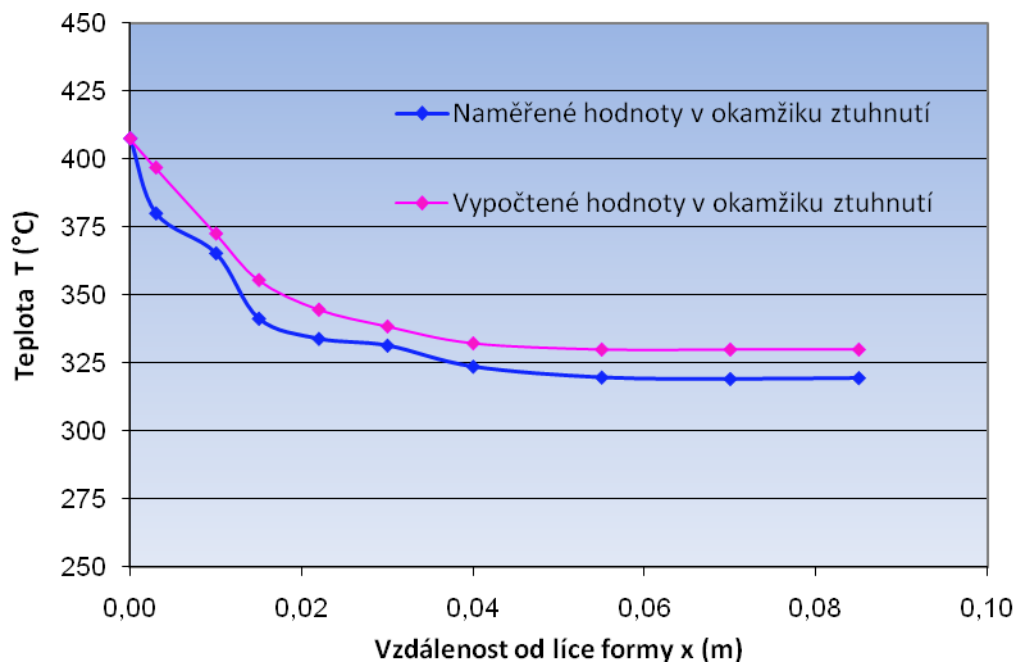
Vzdálenost od líce x [m]	Vypočtené teploty [°C]	Naměřené teploty [°C]
0	256,9	256,9
0,003	210,1	151
0,010	100,9	89,7
0,015	66,9	45,8
0,022	38,5	32,6
0,030	24	21,5
0,040	19,5	19,8
0,055	19,5	19,4
0,070	19,5	19,4
0,085	19,5	19,4



Obr. 3.25 Závislost teploty na vzdálenosti od líce formy v okamžiku ztuhnutí odlitku

Tab. 3.21 Vypočtené a naměřené hodnoty (Zn - přehřátá forma 320°C)

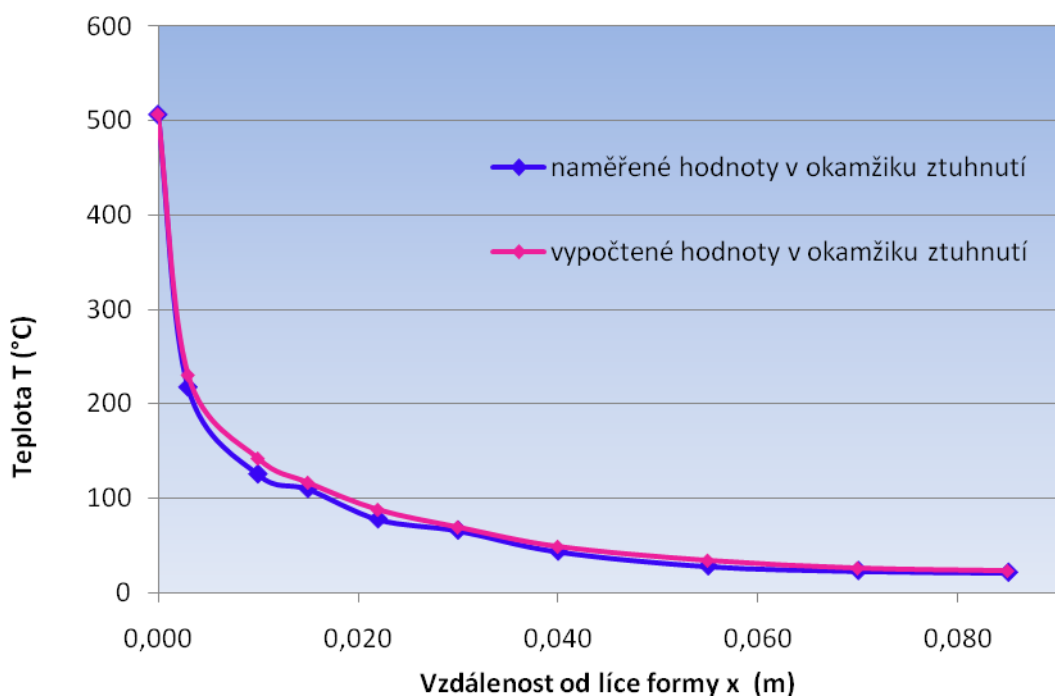
Vzdálenost od líce x [m]	Vypočtené teploty [°C]	Naměřené teploty [°C]
0	407,7	407,7
0,003	397	380,2
0,010	372,7	365,5
0,015	355,6	341,5
0,022	344,7	334,1
0,030	338,5	337,6
0,040	332,3	323,9
0,055	330	319,9
0,070	330	319,3
0,085	330	319,7



Obr. 3.26 Závislost teploty na vzdálenosti od líce formy v okamžiku ztuhnutí odlitku

Tab. 3.22 Vypočtené a naměřené hodnoty (AlSi12 - studená forma 20°C)

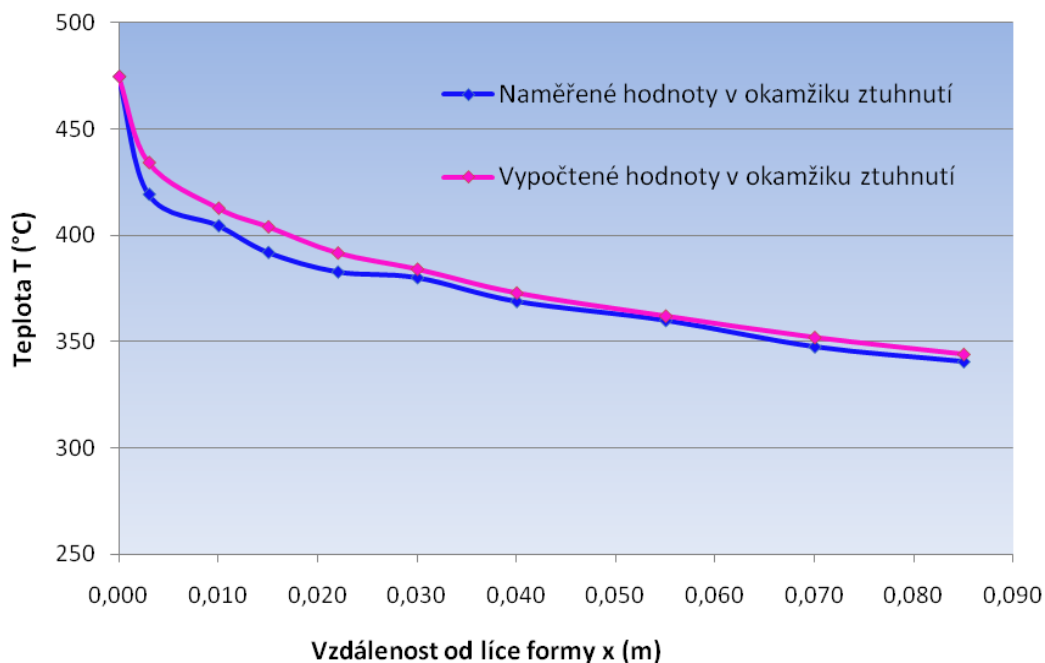
Vzdálenost od líce x [m]	Vypočtené teploty [°C]	Naměřené teploty [°C]
0	506,367	506,367
0,003	225,47	217,381
0,010	132,239	125,262
0,015	116,643	109,673
0,022	87,987	77,640
0,030	69,5	65,649
0,040	48,979	43,408
0,055	31,231	27,850
0,070	24,112	22,802
0,085	21,327	20,971



Obr. 3.27 Závislost teploty na vzdálenosti od líce formy v okamžiku ztuhnutí odlitku

Tab. 3.23 Vypočtené a naměřené hodnoty (AlSi12 - předeřtá forma 340°C)

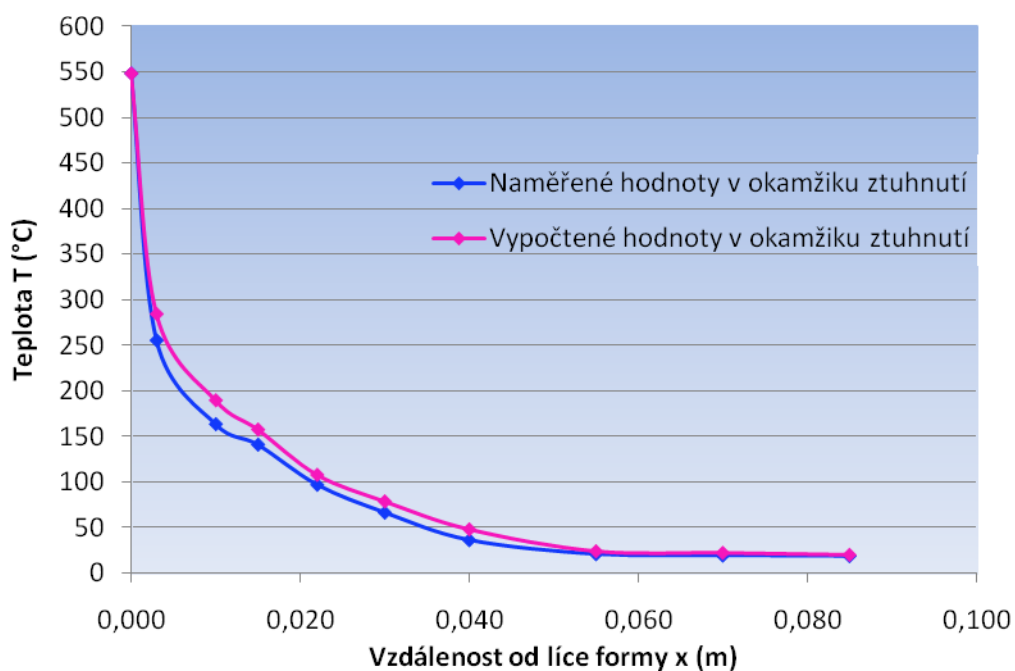
Vzdálenost od líce x [m]	Vypočtené teploty [°C]	Naměřené teploty [°C]
0	474,416	474,416
0,003	434,119	419,114
0,010	412,725	404,360
0,015	404,010	391,805
0,022	391,725	382,613
0,030	384,123	379,912
0,040	372,978	368,747
0,055	362,125	359,817
0,070	352,090	347,420
0,085	344,178	340,431



Obr. 3.28 Závislost teploty na vzdálenosti od líce formy v okamžiku ztuhnutí odlitku

Tab. 3.24 Vypočtené a naměřené hodnoty (AlSi30 - studená forma 20°C)

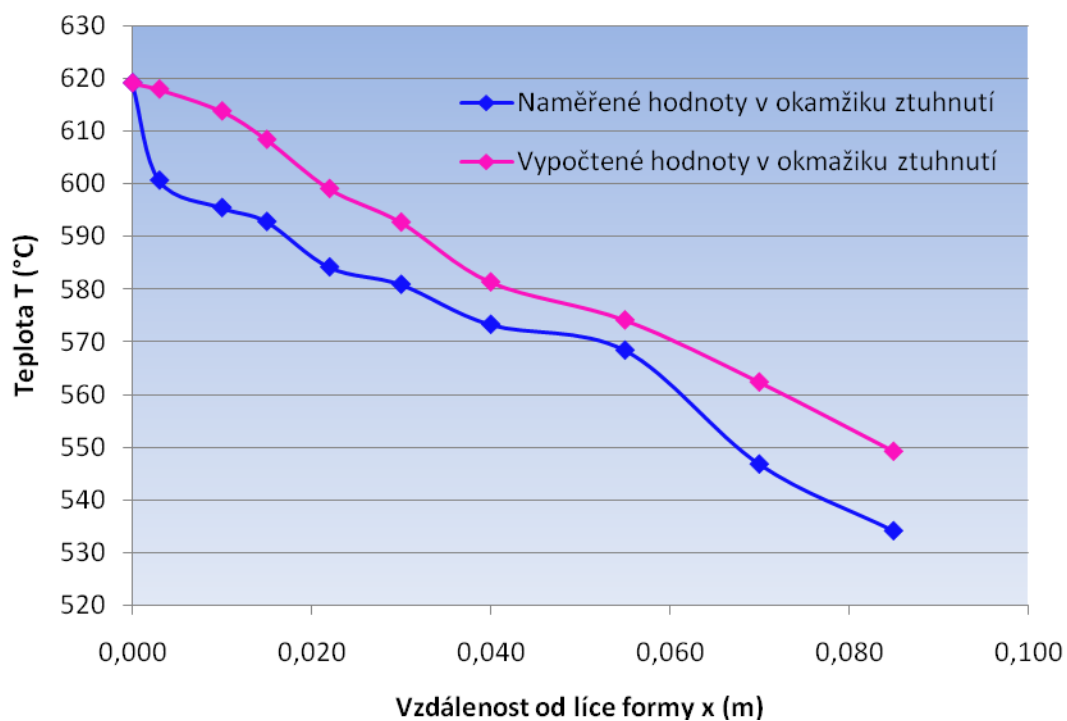
Vzdálenost od líce x [m]	Vypočtené teploty [°C]	Naměřené teploty [°C]
0	547,778	547,778
0,003	284,450	255,243
0,010	189,980	163,362
0,015	157,954	140,818
0,022	108,325	96,818
0,030	79,253	66,375
0,040	48,671	36,158
0,055	24,675	20,795
0,070	22,899	19,338
0,085	20,731	18,645



Obr. 3.29 Závislost teploty na vzdálenosti od líce formy v okamžiku ztuhnutí odlitku

Tab. 3.25 Vypočtené a naměřené hodnoty (AlSi30 - předeřtá forma 420°C)

Vzdálenost od líce x [m]	Vypočtené teploty [°C]	Naměřené teploty [°C]
0	619,040	619,040
0,003	617,876	600,596
0,010	613,722	595,414
0,015	608,341	592,763
0,022	599,024	584,150
0,030	592,648	580,854
0,040	581,317	573,270
0,055	574,112	568,386
0,070	562,341	546,782
0,085	549,211	534,140



Obr. 3.30 Závislost teploty na vzdálenosti od líce formy v okamžiku ztuhnutí odlitku

3.5 Vyhodnocení experimentu

3.5.1 Vyhodnocení křivek časových závislostí na teplotě v jednotlivých místech slévárenské formy

Měření č. 1: Čistý Al – forma bez předehřevu (20°C)

Z grafů na obr. 3.10 a obr. 3.11 je patrné, že vypočtené a nasimulované časové průběhy teplot v jednotlivých místech slévárenské formy jsou přibližně podobné. Teplota krystalizace čistého hliníku odpovídá hodnotě 660 °C. Maximální teplota na líci u experimentu činí 460 °C. Naopak při simulačním výpočtu koresponduje hodnota líce formy s hodnotou taveniny, tj. teplotou 660 °C. Teploty v dalších místech formy nevykazují značné teplotní rozdíly (vykazují spíše shodu), avšak časový náběh teplot při experimentu je pozvolnější než při prováděné simulaci.

Měření č. 2: Čistý Al – forma s předehřevem (175 °C)

Rovněž u formy s předehřevem je z obr. 3.12 a obr. 3.13 patrná podobnost v jednotlivých časových průbězích teplot. Naměřené i nasimulované časové závislosti teplotních průběhů v tepelné ose odlitku jsou téměř shodné. Maximální teplota v tomto místě odlitku činí 660°C. Jistá odlišnost je zřejmá pouze u termočlánku č. 3 (vzdálenost 3 mm od líce formy), kde je patrný razantní pokles z maximálních teplot (tj. kolem teploty 650-660°C) při tuhnutí u nasimulovaných hodnot. Oproti tomu průběh naměřených hodnot je více rovnoměrný, pokles při tuhnutí je pozvolnější. Poslední odlišnost v časových průbězích teplot je viditelná u termočlánku č. 4 (10 mm od líce formy). Zde je nasimulovaný průběh teplot odlišný od naměřeného zejména v počátku lití taveniny do formy, kdy při simulaci je patrný prudký nárůst teploty a poté téměř rovnoměrné ustálení na hodnotě kolem 340°C. Naměřený průběh je rovnoměrnější, růst teplot je pozvolnější a po dosažení maximální teploty opět pozvolně klesá.

Měření č. 3: Čistý Zn – forma bez předehřevu (20°C)

U zinku je největší odlišnost v nasimulovaných a naměřených časových průbězích teplot viditelná u termočlánku umístěného v tepelné ose odlitku. U nasimulovaného průběhu teplota prudce vzrostla až na hodnotu 450°C a následně v krátkém časovém okamžiku poklesla na hodnotu cca 425°C. Na této hodnotě se

teplota ustálila a téměř 30s zůstala konstantní. Poté již následoval naprosto lineární pokles teploty. Zato u naměřeného průběhu teplot je po dosažení 450°C pokles rovnoměrnější, průběh není již tolik lineární. Ostatní průběhy jsou již velmi podobné, jen nárůst teplot je ve většině případů razantnější u simulovaného průběhu teplot.

Měření č. 4: Čistý Zn – forma s předeřevem (320°C)

Maximální teplota u lití zinku do předeřáté formy na 320°C je dle obr. 3.16 a obr. 3.17 odlišná pro naměřený a nasimulovaný průběh teplot. Rozdíl v maximální teplotě lití je u těchto dvou způsobů měření průběhů teplotních polí téměř 15°C. Pokles z této maximální teploty lití je poté opět razantnější u simulace než u naměřených hodnot. Rozdíl v teplotách je také viditelný u termočlánku č. 2 (na líci formy), kdy maximální teplota po odlití je 420°C, resp. 380°C u naměřených a nasimulovaných průběhů teplot. Další odlišnost je patrná u termočlánku č. 7. Růst teplot po odlití je strmější u naměřených hodnot, naopak u simulace je nárůst teploty pozvolnější.

Měření č. 5: Slitina AlSi12 – forma bez předeřevu (20°C)

U tohoto materiálu je dle obr. 3.18 a obr. 3.19 viditelná téměř naprostá shoda v časovém průběhu teplot. Všechny termočlánky vykazují obdobné hodnoty naměřených a nasimulovaných teplot. U tohoto měření bohužel přestal termočlánek umístěný na líci formy zaznamenávat příslušná data, a tudíž není znázorněn průběh tohoto termočlánku jak v naměřených, tak i v nasimulovaných grafech.

Měření č. 6: Slitina AlSi12 – forma s předeřevem (340°C)

Při lití slitiny AlSi12 je časový průběh teplot měřený termočlánkem v tepelné ose odlitku shodný jak pro naměřené, tak pro nasimulované hodnoty (viz obr. 3.20 a obr. 3.21). Jistá odlišnost je viditelná u termočlánku č. 2 (tj. termočlánek na líci formy). Naměřený průběh teplot je zvláštní tím, že po dosažení maximální teploty (550°C) po odlití taveniny do formy se průběh ustálí a s pokračujícím časem je téměř neměnný a zůstává na konstantní hodnotě teploty přibližně 550°C. Oproti tomu nasimulovaný průběh vykazuje odlišnosti jak v maximální hodnotě teploty po odlití (620°C oproti 550°C) tak i v průběhu po dosažení této teploty. U nasimulovaného průběhu totiž teplota po dosažení maxima lehce klesá až k 570°C (rozdíl oproti téměř neměnné teplotě u naměřeného průběhu). Průběh teplot měřených termočlánkem č. 3 bohužel nebylo možné nasimulovat, a proto není zaznamenán v příslušném grafu (obr. 3.21).



U měření č. 7 a u měření č. 8 nebylo možné jednotlivé časové průběhy teplot nasimulovat, jelikož databáze programu QuikCAST neobsahuje příslušnou slitinu AISi12.

3.5.2 Vyhodnocení výpočtu teplotního pole pomocí Gaussova integrálu chyb

Z grafů na obr. 3.22 až obr. 3.30 je možné konstatovat, že porovnání vypočtených hodnot pomocí Gaussova integrálu chyb a naměřených hodnot teplotního pole v okamžiku ztuhnutí odlitku (závislost teploty na vzdálenosti od líce formy v okamžiku ztuhnutí odlitku) je téměř totožné. Odlišnost těchto měření mohou způsobit součinitelé a , c , λ nebo nepřesnost odečítání hodnot z diagramu závislosti Gaussova integrálu chyb na jeho argumentu.

4. DISKUSE VÝSLEDKŮ

Výsledky obsažené v této práci přináší dílčí poznatky o problematice sdílení tepla při gravitačním lití v soustavě: **odlitek - kovová forma**.

Tepelné procesy v kovových slévárenských formách jsou velmi složité děje, které jsou ovlivňovány mnoha činiteli, a které lze popsat, kdyby se to vůbec podařilo, polyvariantní funkcí. Protože to nelze, zaměřila jsem se na charakteristiku nejdůležitějších vlivů, tak jak je dále uvedeno.

Je nutno podotknout, že řešená problematika zahrnuje dvě důležité oblasti:

- a) rešeršní část, ve které je proveden teoretický popis sledované problematiky a seznámení se simulačními slévárenskými programy.
- b) provedení vlastních experimentů a následných simulačních výpočtů tepelných dějů mezi odlitkem a ocelovou formou a výpočtů teplotních polí s využitím Gaussova integrálu chyb.

Výsledky a poznatky z řešení této práce lze shrnout do těchto hlavních oblastí:

1. Z rozboru sledované problematiky je zřejmé, že se jedná o velmi složitý proces. Ke komplikovanosti procesu přispívá vznik plynové mezery, která vytváří tepelný odpor a ovlivňuje intenzitu sdílení tepla mezi taveninou, resp. odlitkem a formou. Odborné práce tohoto charakteru nejsou příliš publikovány. V minulosti se touto problematikou zabýval HAVLÍČEK [2], který podrobně rozpracoval problematiku sdílení tepla v různých typech slévárenských forem. V oblasti výpočetní techniky simulačních výpočtů se u nás touto problematikou zabývá KAVIČKA [11].

V současné době pro popis tepelných dějů je možné použít z teoretického hlediska analytické metody řešení, ty však nezaručují vytvoření přesného matematického popisu pro dané řešení. Pro tyto účely mají uplatnění především numerické metody řešení. Numerickými metodami lze získat v exaktním tvaru požadované výsledky řešení.

2. Pokud je hodnocena práce z hlediska výsledků prováděných experimentů odlévání a z hlediska provedených simulačních výpočtů tepelných dějů s využitím simulačního programu QuikCAST, je nutno konstatovat, že na Katedře strojírenské technologie, FS - TU v Liberci byly v minulosti pro

simulační výpočty dva programy: NOVA CAST (ŠVÉDSKO) a SIMTEC (SRN). Program NOVA CAST byl používán krátkou dobu jen pro simulační účely plnění slévárenské formy taveninou. Velmi se osvědčil program SIMTEC (RWP Aachen), který byl založen na metodě konečných prvků, což vedlo ke zpřesňování výsledků simulačních výpočtů v povrchových vrstvách odlitků. V této souvislosti je nutno podotknout, že s využitím tohoto programu vznikly na této katedře dvě doktorské práce. Těžištěm těchto prací bylo získání teplotní závislosti součinitele přestupu a prostupu tepla a také nalezení shody mezi časovými závislostmi naměřenými a nasimulovanými při odlévání odlitků jednoduchých tvarů (deska a válec do kovové formy). Pokud je v tomto smyslu hodnocen program QuikCAST, je nutno konstatovat, že je to program francouzské provenience, který byl odvozen z předchozího programu SIMULOR, který byl určen pro jednoduché simulační výpočty [1]. S tímto poznatkem je nutno přijímat i získané výsledky simulačních výpočtů, které v některých případech jsou dosti odlišné od naměřených závislostí. Z praktických zkušeností s tímto programem je možno říci, že jeho využití je vhodné k nasimulování odlévání a tuhnutí odlitků vyrobených z běžných slévárenských slitin a současně umí predikovat porezitu odlitků. Jeho nevýhodou je chudá databáze tepelně-fyzikálních veličin a jeho založení na metodě konečných diferencí. Jako další nepřesnost v tomto simulačním programu je vliv tepelného odporu, který je v podstatě převrácenou hodnotou součinitele přestupu, resp. prostupu tepla. Dále je nutno konstatovat, že simulační program QuikCAST neumí simulovat odpovídající teplotu na líci formy, proto výsledky provedené simulace teploty líce formy jsou příliš vysoké, nebo je nelze nasimulovat vůbec.

3. Měřicí zařízení pro sledování časových závislostí teplot v odlitku a ve formě plně odpovídá požadavkům moderních měřících metod, kde byl použit převodník se sběrnicí OMEGA OMB-DAQ-55 a plášťované termočlánky NiCr-Ni od firmy SENSYCON (SRN). Pokud se týká rozměrů ocelové formy je nutno konstatovat, že rozměry 210,5x220x280 [mm] splňují fyzikální předpoklad jednosměrného sdílení tepla. Materiál této formy byl navržen s ohledem na způsob odlévání (gravitační lití) a s ohledem na druh odlévaných materiálů.



Současně byla snaha měřit teplotu také na líci formy a v tepelné ose odlitku. Měření teploty na líci formy a zabudování měřicího čidla do tohoto místa formy vycházelo z dřívějších zkušeností pracoviště. Při tuhnutí a chladnutí odlitku, bylo respektováno, aby čidlo termočlánku bylo vhodným způsobem umístěno na líc formy a tím nedocházelo k ovlivňování odvodu tepla z měřeného místa formy. Tímto byla snaha zabezpečit stejné podmínky měření teploty i v tepelné ose.

5. ZÁVĚR

Předložená diplomová práce, která je zpracována na téma: „*Sledování tepelných poměrů v soustavě odlitek - forma při gravitačním lití*“, je příspěvkem k posouzení vhodnosti simulačního programu QuikCAST pro sledování tepelných dějů v kovové formě při odlévání čistého hliníku, čistého zinku a slitin hliníku.

Diplomová práce je rozdělena do dvou hlavních částí, rešeršní a experimentální. **V rešeršní části práce** je proveden rozbor tepelných dějů v systému odlitek - kovová forma. Značná pozornost je věnována tepelným dějům (sdílení tepla, vedení tepla, vliv mezery mezi odlitkem a formou) a tepelně fyzikálním veličinám. Vedle charakteristiky možných výpočtových metod řešení Fourierovy diferenciální rovnice vedení tepla v trojrozměrném prostoru je provedeno její rozpracování pro řešení metodou konečných diferencí. Samostatná kapitola byla zaměřena na výpočty teplot pomocí Gaussova integrálu chyb, kdy tato metoda byla aplikována pro porovnání hodnot naměřených teplot s vypočtenými teplotami.

Hlavní část práce - **experimentální** byla zaměřena na tři důležité oblasti:

- a) bylo sestaveno měřicí zařízení pro sledování časového průběhu teplot mezi tuhoucím odlitkem a slévárenskou formou, které využívá A/D převodníku se sběrníci a PC;
- b) bylo 8 experimentálních měření odlévání vybraných slévárenských materiálů (čistý hliník, čistý zinek, slitina AlSi12 a AlSi30 do studené formy o teplotě 20°C a do formy přehřáté. Byly sledovány časové závislosti teplot v tepelné ose odlitku a v různých místech kovové formy (0, 3, 10, 15, 22, 30, 40, 55, 70, 85, [mm]).

S použitím programu QuikCAST byly provedeny simulační výpočty tuhnutí a chladnutí odlitků tvaru desky 210,5x220x280 mm z výše uvedených materiálů. Simulační výpočty byly provedeny za stejných podmínek, při kterých probíhaly experimentální měření.

Výsledky a poznatky získané při řešení této práce jsou následující:

1. Použité měřicí zařízení pro sledování časových závislostí teplot sestavené na Katedře strojírenské technologie – TU v Liberci splňují požadavky pro vhodnou registraci sledovaných veličin. Při měření a registraci teplot, svou funkci splňuje nejen počítač, ale také analogový převodník A/D se sběrníci s použitím plášťovaných termočlánků NiCr-Ni - fy. SENSYCON (německé provenience). Zařízení pracuje, s ohledem na přesnost jednotlivých komponent, s teplotní tolerancí ± 5 [°C].



2. Velikost ocelové formy (ČSN 19552) splňuje podmínku jednosměrného sdílení tepla. Tento materiál byl zvolen v souvislosti s jeho použitím při výrobě forem pro gravitační odlévání automobilových dílů ze slitin hliníku.
3. Pro experimenty byly voleny také čisté kovy, které nejsou tradičními slévárenskými slitinami, ale umožnily poměrně snadné zjištění potřebných tepelně-fyzikálních veličin pro následně prováděné simulační výpočty tuhnutí a chladnutí odlitků, dále slitiny AlSi12 a AlSi30.
4. Při provádění vlastních experimentů odlévání, bylo dbáno na dodržování pokud možno stejných podmínek.
5. Použitý simulační program QuikCAST není příliš vhodný pro simulační výpočty netradičních slévárenských materiálů, umožňuje simulace tuhnutí a chladnutí odlitků z běžně používaných slitin.
6. Na základě zkušeností z prováděných simulačních výpočtů byla stanovena důležitost jednotlivých tepelně fyzikálních veličin v závislosti na teplotě. Jsou to: součinitel tepelné vodivosti formy, součinitel měrné tepelné kapacity materiálu formy, přechodový odpor, latentní teplo odlévaného materiálu a součinitel tepelné vodivosti odlévaného materiálu.

6. Použitá literatura

- /1/ NOVÁ, I.: Tepelné procesy ve slévárenských formách. TU v Liberci, 2003. ISBN 80-7083-662-8.
- /2/ HAVLÍČEK, F.: *Teorie slévárenství*. Vysoká škola báňská v Ostravě, 1992.
- /3/ SLOVÁK, S., RUSÍN, K.: *Teorie slévání*. Praha, 1990. ISBN 80-03-00400-4.
- /4/ VETIŠKA, A.: *Teoretické základy slévárenské technologie*. 2. upr. vyd., Praha, 1974.
- /5/ NOVÁ, I.: *Teorie slévání I*. TU v Liberci, 2006. ISBN 80-7372-149-X.
- /6/ RAGAN, E.: *Liatie kovov pod tlakom*. Prešov, 2007. ISBN 978-80-8073-979-9.
- /7/ www.mmspektrum.com (leden 2009).
- /8/ www.boucnik.cz (duben 2010).
- /9/ ime.fme.vutbr.cz, Ing. Lubomír Stránský, CSc., Prof. Ing. Karel Stránský, DrSc. – Tuhnutí a krystalizace odlitků (květen 2010).
- /10/ <http://www.omega.com> (květen 2010).
- /11/ KAVIČKA, F.: *Termokinetika tuhnutí*. VUT v Brně, FS, 2009.



Prohlášení

Byla jsem seznámena s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském zejména paragraf 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědoma povinnosti informovat o této skutečnosti TUL, v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracovala samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum 28.5.2010

Podpis



Declaration

I have been notified of the fact that Copyright Act No. 121/2000 Coll. Applies to my thesis in full, in particular Section 60, School Work.

I am fully aware that the Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my thesis for the internal purposes of TUL.

If I use my thesis or grant a licence for its use, I am aware of the fact that I must inform TUL of this fact; in this case TUL has the right to seek that I pay the expenses invested in the creation of my thesis to the full amount.

I compiled the thesis on my own with the use of the acknowledged sources and on the basis of consultation with the head of the thesis and a consultant.

Date 28.5.2010

Signature

